



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

고온가스로의 소형파단 사고 시
공기 침투 현상에 대한 실험 및
전산유체해석

2015년 2월

서울대학교 대학원

원자핵공학과

김 재 순

고온가스로의 소형파단 사고 시 공기 침투 현상에 대한 실험 및 전산유체해석

지도교수 김 응 수

이 논문을 공학석사학위논문으로 제출함

2014년 12월

서울대학교 대학원

원자핵공학과

김 재 순

김재순의 석사학위논문을 인준함

2014년 12월

위 원 장	<u>조 형 규 (인)</u>
부위원장	<u>김 응 수 (인)</u>
위 원	<u>김 성 중 (인)</u>

국문 초록

고온가스로(VHTR)는 헬륨 냉각재, 흑연 감속재, TRISO연료를 통하여 냉각재상실사고시에도 핵연료의 온도 제한인 1600℃를 초과하지 않는 동시에 핵분열물질을 누출시키지 않아 고유안전성을 확인한 차세대 원자로이다. 그러나 고온가스로 내부를 이루고 있는 흑연 연료, 구조재는 고온에서 산소에 노출될 경우 흑연의 산화반응을 통해 노심의 가열 가속화, 일산화탄소 방출, 탄소 구조재의 경화 등의 문제를 일으킨다. 이에 특별한 조치가 취해지지 않으면 공기유입이 곧 연료의 손상으로 이어져 방사성 물질의 누출 등을 일으킬 수 있다. 따라서 고온가스로 노심의 안전성 확보를 위해 공기유입현상은 반드시 연구되어야 한다.

기존의 연구에서는 주 배관 파단(Double Ended Guillotine Break)시의 공기유입에 집중하고 있으나 계통 내에 작은 규모의 파손(Small Break)이 있을 시에도 공기는 원자로 내부로 매우 빠르게 유입되어 고온가스로의 건전성에 중대한 영향을 미친다. 그러나 현재까지는 작은 규모 파손시의 공기유입에 대해서 사고를 충분히 해석할 수 있을 정도의 정량화 된 자료가 부재한 실정이다.

본 연구는 주요 파손 특성에 따른 공기유입 정도와 형태를 분석하여 지금까지 충분하지 못했던 고온가스로의 소형 파단(SB-LOCA)시의 공기유입현상 이해를 도모하고, 사고 시의 현상을 정밀히 예측 가능할 수 있도록 정량적 데이터를 획득 하는데 그 목표를 두었다.

이러한 목표 아래 실험을 설계하고 수행하여 주요 변수들에 대한 공기 유입률 자료를 취득하였으며 전산유체해석을 통해 현상의 경향성을 확인하였다.

주요어

고온가스로, 공기유입, 소형 파단, 실험, 전산유체해석,

학번: 2013-21008

목차

국문 초록.....	i
목차.....	ii
그림 및 사진 목차.....	iv
표 목차.....	vii
1.서론.....	1
1.1.고온가스로의 공기유입 사고.....	1
1.2.기존의 공기유입 사고 연구.....	2
1.3.소형 파단 사고시의 공기유입.....	4
1.4.연구 목적.....	4
2.소형파단 공기유입 실험.....	10
2.1.실험 조건.....	10
2.2.실험 장치.....	11
2.3.실험 방법.....	12
2.4.자료 분석 방법.....	14
2.4.1.공기유입률 dV_{air}/dt 와 \dot{V}	15
2.4.1.1.유입률별 특징.....	15
2.4.1.2.유입률 유도.....	16
2.5.실험 결과.....	20
2.5.1.밀도 비 효과.....	20
2.5.2.파손 각도 효과.....	21
2.5.3.파손 크기 효과.....	23
2.5.4.내부 유속 효과.....	24
2.6.토의	26
3.소형파단 공기유입 전산유체 해석.....	47
3.1.해석 모델	47
3.1.1.형상 및 격자 모델	47
3.1.2.물리 모델	47

3.1.2.1.기본 지배 방정식.....	48
3.1.2.2.부력 모델.....	49
3.1.2.3.수송 방정식.....	50
3.1.3.물성치.....	50
3.1.4.경계 조건.....	51
3.1.5.초기 조건.....	52
3.2.해석 결과.....	52
3.2.1.밀도 차 효과.....	52
3.2.2.파손 각도 효과.....	52
3.2.3.파손 면적 효과.....	53
3.2.4.내부 유속 효과.....	54
3.3.토의.....	55
4.공기유입현상 분석.....	74
4.1.Froude 수 정의.....	74
4.1.1.Froude 수와 $Fr_{projected}$ 유도.....	74
4.1.2.각 Froude 수의 특징.....	74
4.2.지배 영역 구분 (부력 우세, 확산 우세).....	77
4.3.토의.....	79
5.결론.....	86
참고문헌.....	88
Abstract.....	90

그림 및 사진 목차

그림 1.1. Loss of Forced Convection (LOFC) Test Result.....	7
그림 1.2. 연소도에 따른 초고온가스로 구조재 (IG-110 흑연)의 Normal compressive strength의 변화.....	7
그림 1.3. DEGB 공기유입 사고 시나리오	8
그림 1.4. 일본 JAEA의 HTTR 개략도	9
그림 1.5. 파손 각도에 따른 유입 매커니즘.....	9
그림 2.1. General Atomic사 GT-MHR 소내 개략도.....	33
그림 2.2. 일본 JAEA의 HTTR 소내 개략도.....	33
그림 2.3. 실험장치 개략도.....	34
그림 2.4. 실험장치 전경도.....	34
그림 2.5. Test-section.....	35
그림 2.6. 루프 내 밸브 구성.....	35
그림 2.7. 산소 농도 취득 자료 (2번 산소센서).....	36
그림 2.8. 농도변화 기울기 취득 구간 예시 (D=15mm, V=0.370m/s, 120deg, 산소농도 3.9%).....	36
그림 2.9. dV_{air}/dt 와 \dot{V} 의 물리적 의미.....	37
그림 2.10. dV_{air}/dt vs 밀도 비 (D=15mm, U=0m/s CFD).....	37
그림 2.11. \dot{V} vs 밀도 비 (D=15mm, U=0m/s CFD).....	38
그림 2.12. \dot{V} vs 밀도 비 (D=15mm, U=0.275m/s, 실험).....	38
그림 2.13. dV_{air}/dt vs 밀도 비 (D=15mm, U=0.275m/s, 실험, 보간).....	39
그림 2.14. 평균 dV_{air}/dt vs 밀도 비 (D=15mm, U=0.275m/s, 보간).....	39
그림 2.15. 분산 vs 밀도 비 (D=12mm, U=0.370m/s, 실험).....	40
그림 2.16. dV_{air}/dt vs 각도 (D=15mm, U=0.370m/s, 실험) ..	40

그림 2.17. dV_{air}/dt vs 밀도 비 (0.270m/s, 60~150도 평균, 실험).....	41
그림 2.18. 면적 증가에 대한 유입률 증가율 비교, dV_{air}/dt vs 밀도 비 (0.270m/s, 60~150도 평균, 실험).....	41
그림 2.19. dV_{air}/dt vs 밀도 비 (U=0.270m/s 180도, 실험).....	42
그림 2.20. dV_{air}/dt vs 밀도 비 (U=0.270m/s 30도, 실험).....	42
그림 2.21. dV_{air}/dt vs 밀도 비 (U=0.270m/s 0도, 실험).....	43
그림 2.22. 보관 전 dV_{air}/dt (D=18mm, U=0.275m/s, 실험)....	43
그림 2.23. 보관 후 dV_{air}/dt (D=18mm, U=0.275m/s, 실험)....	44
그림 2.24. 보관 전 dV_{air}/dt (D=18mm, U=0.370m/s, 실험)....	44
그림 2.25. 보관 후 dV_{air}/dt (D=18mm, U=0.370m/s, 실험)....	45
그림 2.26 유속 변화에 따른 60~150도 평균 dV_{air}/dt vs 밀도 비 (D=15mm, 실험).....	45
그림 2.27. 유속 변화에 따른 0, 30도 평균 dV_{air}/dt vs 밀도 비 (D=15mm, 실험).....	46
그림 3.1 CFD 계산 모델.....	68
그림 3.2. CFD 격자 모델	68
그림 3.3. 파손 부위 격자 모델.....	69
그림 3.4. dV_{air}/dt vs 밀도 비 (D=15mm, U=0.275m/s, CFD, 실험과 비교).....	69
그림 3.5. dV_{air}/dt vs 각도 (D=15, U=0.370m/s, CFD).....	70
그림 3.6. dV_{air}/dt vs 각도 (최대 유입 각도 계산, CFD).....	70
그림 3.7. 속도로 구분한 유출 및 유입 면적 (CFD).....	71
그림 3.8. 각도별 유입 및 유출 단면적.....	71

그림 3.9. 각도별 유입 및 유출 단면적.....	71
그림 3.10. CFD 단면적 비율 계산 위치.....	72
그림 3.11. 면적 비 반영/반영하지 않은 Froude 수 차이 (D=15mm, U=0m/s, CFD).....	72
그림 3.12. 유속 변화에 따른 60~150도 평균 dV_{air}/dt vs 밀도 비 (D=15mm, CFD).....	73
그림 3.13. 유속 변화에 따른 0, 30도 평균 dV_{air}/dt vs 밀도 비 (D=15mm, CFD).....	73
그림 4.1. 밀도 차에 의한 유체 교환 높이.....	80
그림 4.2. 실험 시 유체 교환 높이.....	80
그림 4.3. Froude 수 vs 밀도 비 (D=15mm, U=0m/s, CFD)....	81
그림 4.4. $Fr_{projected}$ vs 밀도 비 (D=15mm, U=0m/s, CFD).....	81
그림 4.5. Froude vs 밀도 비 (D=3mm, U=0.275m/s, 실험)....	82
그림 4.6. Froude vs 밀도 비 (D=18mm, U=0.275m/s, 실험)...	82
그림 4.7. 부력 우세 구간(밝은 부분) 및 관성력 우세 구간 (어두운 부분) 구분.....	83
그림 4.8. 지배매커니즘 별 Froude criteria.....	83
그림 4.9. Fr_{proj}^2 vs 밀도 비 (D=15mm, U=0m/s, CFD).....	84
그림 4.10. Fr_{proj}^2 vs 각도 (D=15mm, U=0m/s, CFD).....	84
그림 4.11. Fr_{proj}^2/θ vs 밀도 비.....	85

표 목차

표 2.1 실제 사고 대비 실험 설계 변수	28
표 2.2 실험 Test Matrix 1.....	29
표 2.3 실험 Test Matrix 2.....	30
표 2.4 실험 Test Matrix 3.....	31
표 2.5 유속 변화 (0.275m/s → 0.370m/s)에 따른 유입률 변화율 (실험).....	32
표 2.6 유속 변화 (0.370m/s → 0.430m/s)에 따른 유입률 변화율 (실험).....	32
표 3.1 공기유입 장치 모델 매쉬 통계.....	57
표 3.2 해석 케이스 및 계산 주요 변수 (내부유속 0m/s).....	57
표 3.3 해석 케이스 및 계산 주요 변수 (내부유속 0.1m/s).....	58
표 3.4 해석 케이스 및 계산 주요 변수 (내부유속 0.275m/s).....	59
표 3.5 해석 케이스 및 계산 주요 변수 (내부유속 0.370m/s).....	60
표 3.6 해석 케이스 및 계산 주요 변수 (내부유속 0.435m/s).....	61
표 3.7 Kinematic Diffusivity 입력값.....	62
표 3.8 기체 물성치	62
표 3.9 해석 모델 경계 조건	62
표 3.10 파손 지름 15mm, 내부 유속 0.275m/s에서의 실험-계산 차이값	63
표 3.11 파손 지름 15mm, 내부 유속 0.275m/s에서의 실험-계산 오차(실험값 기준)	63
표 3.12 유입 면적 비 CFD 계산 값 (내부 유속0m/s).....	64
표 3.13 유입 면적 비 CFD 계산 값 (내부 유속0.1m/s).....	65
표 3.14 유입 면적 비 CFD 계산 값 (내부 유속0.275m/s).....	66
표 3.15 유입 면적 비 CFD 계산 값 (내부 유속0.370m/s).....	67

1. 서론

1.1. 고온가스로의 공기유입 사고

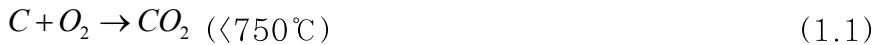
고온가스로는 차세대 원자로인 Generation-IV(GEN-IV)에 속한 노형 중 하나로써, 950℃에 이르는 고온의 정상운전 온도를 채택하여 높은 열효율과 수소 생산, 해수 담수화와의 연계 등을 가능케 하였다[1]. 또한 냉각재 상실 사고에도 내부 흑연 구조재의 높은 열전도도, 원자로 용기의 복사열전달에 의한 피동잔열제거(Passive decay heat removal)와 함께 격납용기 내부의 공기의 대류만으로도 핵연료의 제한온도인 1600℃를 넘지 않도록 설계되었으며[2], 이미 중국의 10MW High Temperature Gas-cooled reactor-test Module(HTR-10)과 일본의 High Temperature Engineering Test Reactor(HTTR)은 모의냉각능력상실사고(LOFC, Loss Of Forced Convection)를 실시하여 그 고유안전성을 입증하였다[그림 1.1].[2,3] 이러한 고유안전성을 확보하기 위하여 고온가스로는 흑연 구조재, 헬륨 냉각재, 삼중피복연료인 TRIStructural-ISOtropic(TRISO) 연료를 사용하는 것이 특징이다.

흑연은 원자로 개발 초기부터 감속재 등에 사용되어 왔으므로, 노내 특성과 거동이 잘 알려져 있다는 장점이 있다.[4] 초기의 원자로에서는 고속중성자에 의한 에너지 축적이 문제가 될 수 있어 운전 온도가 300~400℃내로 제한되었지만 차세대 원자로에서는 최대 1000℃에 이르는 고온에서 운전되어 이 조건에서는 에너지 축적이 적다. 또한 헬륨은 불활성 기체로서 고온에서도 노내의 물질과 반응을 일으키지 않아 고온가스로의 건전성을 유지하는데 유리한 특성을 갖고 있다.

고온가스로는 노심지지격자, 반사체뿐만 아니라 핵연료 등의 구조재에도 흑연을 채택하였다. 그러나 이는 냉각재상실사고(LOCA, Loss-Of-Coolant Accident) 발생 시 문제가 될 수 있다. 파손으로 인하여 냉각재인 헬륨이 빠져나간 후, 파손 부위를 통해 외부의 공기가

노내로 유입될 경우 공기 중의 산소가 구조물과 반응하여 여러 문제를 야기할 수 있다. 이를 고온가스로의 공기유입사고(Air-ingress Accident)라고 한다.

흑연은 온도에 따라 750℃ 이하의 저온에서는 이산화탄소를 생성하는 반응이 우세하며, 750℃이상의 고온에서는 일산화탄소를 생성하는 반응이 우세하다고 알려져있다. [5]



이 두 반응은 산화 반응의 일종으로 흑연 구조재의 산화로 인하여 1) 노심의 가열 가속화, 2) 흑연 구조재의 강도 약화[그림 1.2]등의 문제를 야기할 수 있다. 또한 3) 고온에서 생성되는 일산화탄소는 인체에 유해할 뿐만 아니라 인화성을 가지고 있어 또 다른 2차적인 문제를 야기할 가능성이 있다. 따라서 고온가스로의 고유안전성을 확보하기 위해서는 공기유입사고에 대한 정확한 이해와 이것이 고온가스로의 안전에 미치는 영향에 대한 정확한 평가가 선행되어야 한다.

1.2. 기존의 공기유입 사고 연구

고온가스로와 관련된 기존 공기유입 사고 연구는 대부분 가장 보수적인 경우인 양단동시완전파단(DEGB, Double Ended Guillotine Break)의 경우에 집중되어 있다. 이는 고온가스로에서 전력변환계통과 연결되어있는 동심주증기관(Co-axial main coolant pipe)이 동시에 완전히 절단된 후 곧바로 떨어져 나가 파손 부위를 통해 냉각재의 상실이 급격하게 일어나는 사고를 가정한다. 이 동심주증기관의 외관은 저온관(Cold Leg), 내관은 고온관(Hot Leg)으로 이루어져 있으나 아직 정확한 크기는 결정된 것이 없다. Gas Turbine Modular Helium

Reactor(GT-MHR)의 경우 외경 2.4m, 내경 1.5m 정도를 채용하고 있다.[6]

기존에 주로 연구 된 DEGB 사고의 시나리오는 소형 파단시의 사고 시나리오와 그 거시적 맥락이 서로 크게 다르지 않다. DEGB 사고 시나리오는 다음과 같다 [그림 1.3] [7]

1) 원자로 감압 (Depressurization)

이 단계에서는 원자로 내부에 70~80 기압으로 가압되어있던 헬륨이 파손 부위를 통해 노외로 유출된다. 감압은 격납용기와 원자로 내부의 압력이 같아질 때까지 계속된다.

2) 1단계 층류 유입

감압이 종료되면 격납용기에 있던 공기가 파손을 통해 노내로 유입되기 시작한다. 이 때, 밀도 차에 의해 생성된 부력에 의하여 상대적으로 가벼운 유체인 헬륨은 위쪽으로 유출, 무거운 유체인 외부 공기는 아래쪽으로 층을 이루며 유입된다. 이렇게 유입된 공기는 원자로의 하부 플레넘과 반사체 하부쪽에 쌓이게 된다.

3) 2단계 층류 유입

공기가 원자로의 하부를 채우고 난 뒤에는 노심 하부에서 가열된 유체가 파손부위를 통해 다시 원자로 밖으로 빠져나감과 동시에 외부의 차가운 공기가 내부로 유입되며 국부적인 자연대류가 시작된다. 이 과정이 계속되며 밀도 차에 의한 부력과 확산에 의해 원자로 상부까지 유입된 공기가 상승하기 시작한다. 이렇게 노내로 유입된 공기는 흑연 구조재와 반응하여 산화를 일으키며 구조의 약화, 이산화탄소 및 일산화탄소 방출 등을 야기한다.

4) 자연 대류

유입된 공기가 노심 최상단까지 도달하여 노내가 완전히 공기로 채워진 후에는 붕괴열로 인해 가열된 공기가 원자로 상부로 이동하며 노심 전체에서 대류가 진행된다. 이렇게 가열된 공기는 파손 부위를 통해 빠져나가고 다시 노외의 공기가 유입되며 원자로의 붕괴열을 제거한다.

이 뿐만 아니라 일본 Japan Atomic Energy Agency(JAEA)의 기존 연구에서는 일본의 연구용 고온가스로인 HTTR의 동심주증기관이 원자로의 최 하부에 위치하며 방향이 아래쪽으로 향해 있기 때문에 [그림 1.4] DEGB 사고가 발생할 경우, 상대적으로 매우 느린 이동현상인 기체의 확산에 의해서 주로 공기유입이 이루어진다고 보고하였다[8].

1.3. 소형 파단 사고시의 공기유입

DEGB은 개념적으로 자연대류가 야기되었을 경우 가장 많은 양의 공기가 원자로 노심내로 유입될 수 있는 가상의 사고이나 이것은 확률적으로 발생하기 매우 어려운 사고이다. 반면 실제 고온가스로에서는 파단의 크기가 작은 소형 파단의 경우가 확률적으로 더 발생하기 쉽다.[9] 현재까지는 이에 대한 Phenomena Identification and Ranking Table(PIRT) 자료가 부재하여 정량적인 사고 확률을 인용하는 것은 어려우나, 계측설비관(Instrument Line), 중간열교환기(Intermediate Heat Exchanger) 등 소형의 파손이 일어날 수 있는 부위는 다양하고 상대적으로 취약한 것이 자명하다. 실제로 조그만 파손이 일어났을 경우에도 냉각재의 감압 후 다량의 공기가 지속적으로 유입될 수 있으며 이는 원자로의 건전성에 부정적인 영향을 미칠 수 있다.

하지만 현재까지는 소형파단에 대해서는 상대적으로 연구가 거의 이루어지지 않았으며 정량적 실험 자료도 충분치 않은 실정이다[10]. 따라서 본 연구에서는 실험 및 전산해석을 통하여 소형파단사고 시 공기유입현상을 이해하고 이를 해석할 수 있는 모델을 개발하는 것을 주요 목표로 하였다.

소형파단에 대한 정확한 정의는 아직 결정된 바는 없으나 Idaho National Laboratory에서 2010년 발행된 보고서 Next Generation Nuclear Plant Methods Technical Program Plan[1]에 따르면

$1/2in^2$ ($3.2258cm^2$)보다 작은 면적의 파손을 Small break으로 정의하고 있으며 이 경우의 공기 유입 사고를 설계기준사고(Design Basis Accident,DBA)로 분류하고 있다.

기존의 연구에 따르면 소형파단사고시의 공기유입현상은 양단완전동시파단보다 훨씬 복잡하고 다양한 인자에 의해서 영향을 받는다고 알려져 있다. 소형 파단시의 공기유입 현상은 유입 각도에 따라 유입 주요 원리가 달라진다. 수직 하부 방향을 기준인 0도로 잡을 때, 공기는 낮은 각도인 0도 주변에서는 (a) 확산에 의해 주로 유입된다. 서서히 각도가 증가하면서 무거운 공기가 아래로 흘러 들어오며 동시에 가벼운 헬륨이 위로 흐르며 빠져나가는 (b) 층류 유입 영역, 각도가 높아짐에 따라 들어오는 유체와 빠져나가는 유체가 서로 간섭하는 (c) 간헐적 유입 영역이 있다. [그림 1.5], [9]

- (a) 확산(Diffusion)에 의한 유입 영역: 하부에 파손이 발생하였을 경우의 주요 유입 원리이다. 상대적으로 밀도가 높은 공기가 아래에 위치하며, 밀도가 낮은 헬륨 냉각재가 위쪽에 위치하여 급격한 유체의 교환 없이 안정적이다. 오직 확산에 의해서만 공기가 유입되므로 이 영역에서는 다른 두 영역에 비해 유체 유입이 느리다.
- (b) 층류 유입(Stratified flow) 영역: 밀도차이에 의해 유체가 급속히 유입된다. 상대적으로 비중이 큰 유체인 외부의 공기가 하단으로 유입되며 비중이 낮은 헬륨 냉각재가 상단으로 유출되며 층류를 이룬다.
- (c) 간헐적 유입(Intermittent flow)영역: 밀도가 높은 공기가 상부에 위치하며 밀도가 낮은 헬륨 냉각재가 하부에 위치하여 매우 불안정하다. 따라서 유입되는 유체와 유출되는 유체가 서로 간섭하며 층류보다 느린 속도로 유입된다.

본 연구에서는 (1) 파손 각도의 위치를 변경시킴과 더불어

공기유입에 주요한 영향을 미치는 변수로 알려진 (2) 밀도 차, (3) 파손 크기, (4) 내부 유속을 각각 변화시켜가며 실험 및 전산유체역학(CFD)해석을 실시, 해당 독립변수들이 유입에 미치는 정도를 확인하였다.

1.4. 연구 목적

본 연구에서는 1)밀도 비, 2)파손 각도, 3)내부유속, 4)파손 크기의 주요 소형 파손 특성에 따른 공기유입 정도와 형태를 분석하여 지금까지 충분하지 못했던 고온가스로의 소형 파단(Small Break Loss-of-Coolant Accident, SB-LOCA)시의 공기유입현상을 이해하고, 사고 시의 현상을 정밀히 예측 가능한 정량적 자료를 취득하는데 그 목표를 두었다.

이를 목표로 실험을 실시하여 주요 변수들에 대한 공기 유입률 자료를 취득하였으며 전산유체해석을 통해 현상의 경향성을 검증하였다.

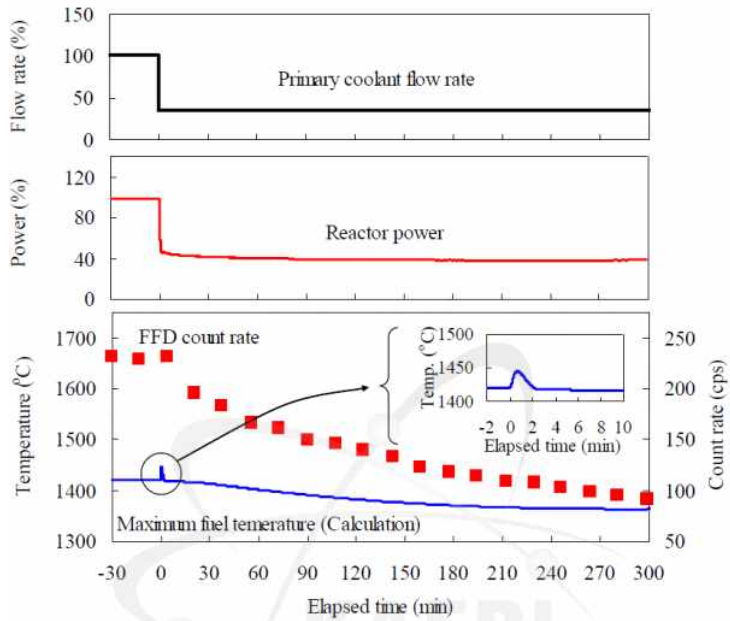


그림 1.1 Long Term Reactor Transient during partial Loss of Forced Convection (LOFC) Test at 30MW [2]

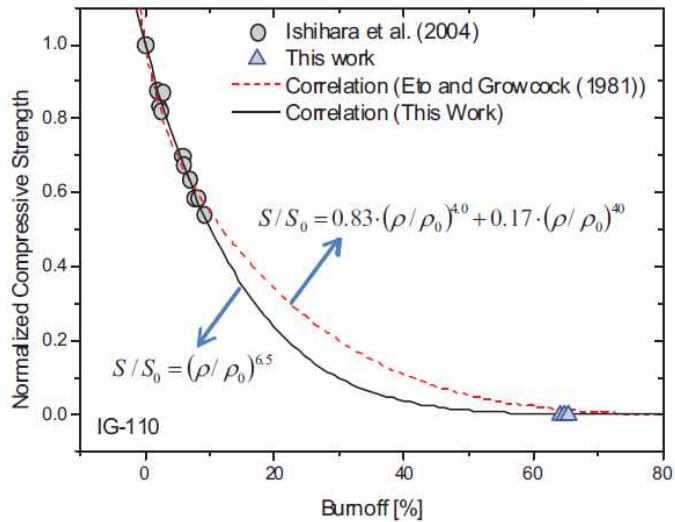


그림 1.2 연소도에 따른 고온가스로 구조재 (IG-110 흑연)의 Normal compressive strength의 변화 [7]

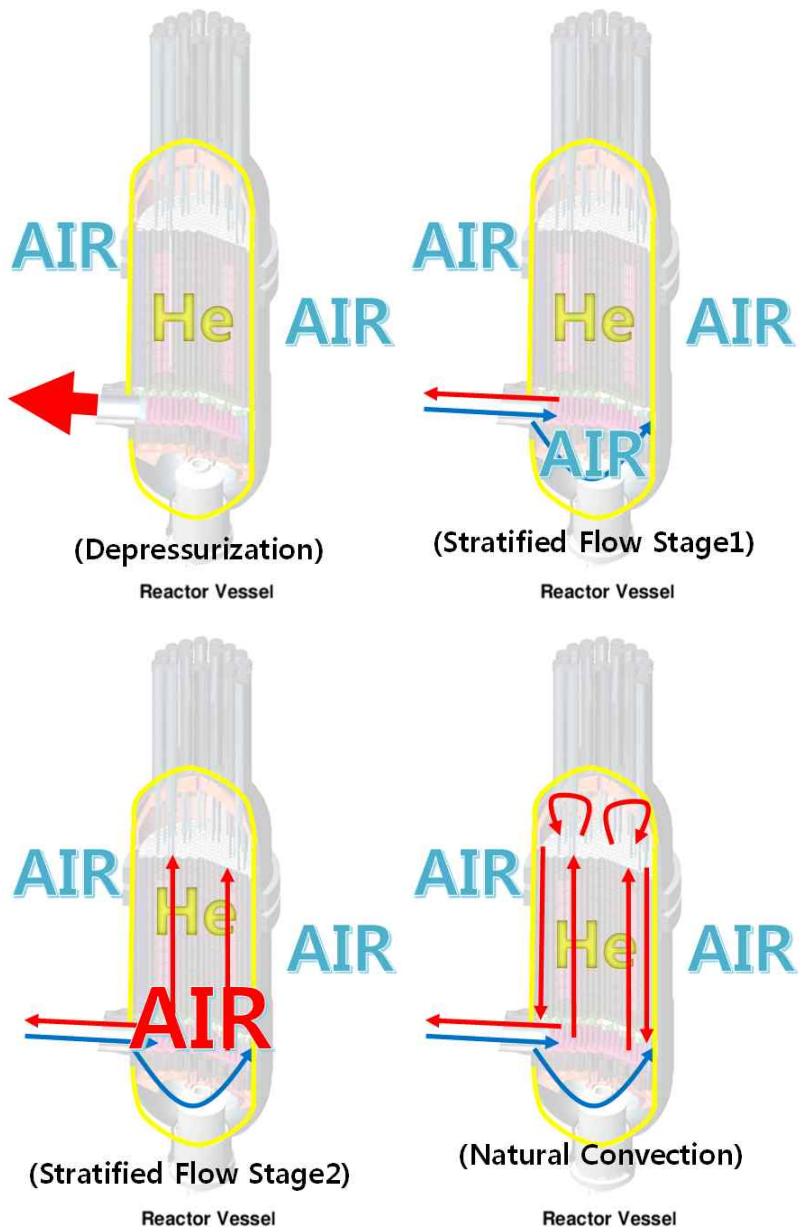


그림 1.3 DEGB 공기유입 사고 시나리오 [7]

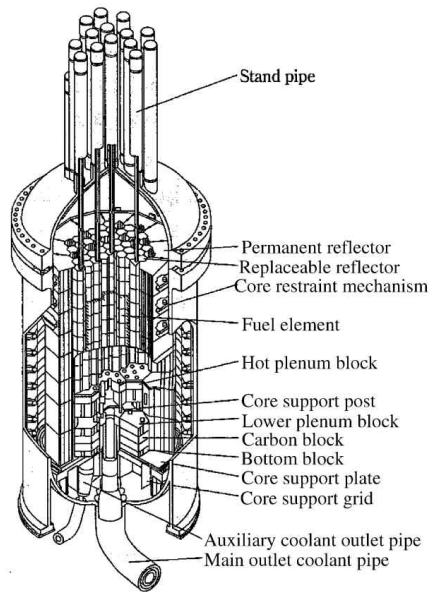
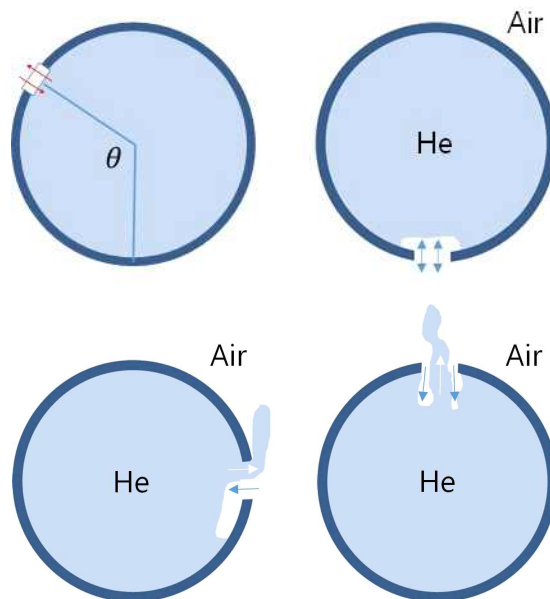


그림 1.4 일본 JAEA의 HTTR
개략도 [11]



(좌-상) 파손 각도, (우-상,(a)) 농도차에 의한 확산,
(좌-하,(b)) 층류 유입, (우-하,(c)) 간헐적 유입
그림 1.5 파손 각도에 따른 유입 매커니즘 [9]

2. 소형파단 공기유입 실험

2.1. 실험 조건

본 연구에서는 주요 변수로 알려진 1)파손 각도, 2)파손 크기, 3)내부 유속, 4)밀도 차 네 가지 변수를 각각 변경시켜가며 105개 케이스에 대하여 실험을 실시하였다. 각 케이스는 다섯 가지 산소 농도 구간(3%, 8%, 12%, 16%, 18% 주변)에서 산소변화율을 취득한다.

고온가스로의 확정된 설계는 아직 결정된 것이 없으나 미국 General Atomic 사의 GT-MHR [그림 2.1]과 일본 JAEA의 HTTR[그림 2.2]에서 소형 파단이 일어날 가능성이 있는 부분을 추려내어 [표 2.1]에 나타내었다. 본 연구의 대상은 다양한 고온가스로 노형에서 공통적으로 발생할 수 있는 소형 파단 사고 후의 공기유입 현상이다. 실제 사고 상황에서는 파손 부위를 통해 감압이 일어나며[그림 1.3], 소형 파손으로 인한 감압(Depressurization)후에는 노내-노외의 압력이 같아져 원자로 외부의 공기가 노내로 유입될 수 있다. 이 때, 파손 각도에 따라서 밀도 차에 의한 부력(Buoyancy driven flow)과 기체 확산(Diffusion)에 의해 노내-노외의 기체가 교환된다. 두 현상 모두 밀도 차에 의한 것으로 본 실험에서는 헬륨 및 공기를 이용, 원형의 밀도 차를 모사하였다.

감압 직후의 원자로 냉각재는 950도에 가까운 고온의 헬륨으로, 사고 초기에는 매우 낮은 밀도 특성과 열에 의한 거동 특성을 지니고 있다. 본 실험은 열적인 효과를 따로 고려하지 않고 상온에서 실시하여 오직 밀도 차에 의한 이동만을 고려하였다. 이는 거시적인 기체의 이동 현상이 주로 밀도 차에 의해 영향을 받으며 열적인 효과를 밀도 차가 변화하는 정도에 포함할 수 있기 때문이다. 추후 연구에서는 이러한 열적인 변수를 추가적으로 고려하여 더욱 정확한 검증할 필요가 있을 것으로 예상된다.

실험은 9.8cm 지름의 관에 대기압, 상온 상태의 헬륨-공기

혼합기체를 순환시킨 후 고무 마개를 열어 자연스럽게 유입되는 공기의 양을 측정한다. 이 과정에서 공기유입현상은 내부의 관성력과 밀도 차에 의한 부력이 경쟁하게 되는데, 본 연구에서는 두 지배 매커니즘 중 우세한 현상이 나타나는 기준으로 Froude criteria수를 제안하며 이의 근거는 4장의 모델 개발에서 다루게 될 것이다. 이 중 관성력은 내부 유속 및 파손 크기와 연관되며, 본 연구의 실험 조건은 실제 조건에서의 두 우세영역 중 일부분과 과도 구간을 모사한다.

2.2. 실험 장치

이 실험장치는 산소 계측기를 통해 루프 내의 산소농도를 측정하도록 설계되었다. 그림 2.3과 그림 2.4는 각각 전체 실험장치의 계통도와 전경이다. 실험은 대기압, 상온 조건(101.325kPa, 27도, 공기 밀도 1.176kg/m^3 , 공기 점성도 $1.858 \cdot 10^{-5}\text{kg/m}\cdot\text{s}$)에서 실시되며 다음과 같은 부분으로 이루어져 있다.

- (a) **실험부(Test-section)**[그림 2.5]: 실험부는 지름 9.8cm의 원형 관으로 교체가 가능하도록 루프에 클램프를 이용해 결합되어 있다. 각 테스트 섹션은 파손 지름(3mm, 6mm, 12mm, 15mm, 18mm)별로 5종류가 미리 제작되어 있다. 한 지름 당 7개의 각도 (0, 30, 60, 90, 120, 150, 180도)의 구멍이 미리 뚫어져 있으며 실험하지 않는 각도의 구멍은 고무캡으로 막아둔다.
- (b) **블로워**: 두 개의 블로워가 루프 내의 공기-헬륨 혼합기체를 순환시킨다. Mixing tank에 병렬로 설치되어 있으며 유속이 조절 가능하다.
- (c) **믹싱 탱크**: 믹싱 탱크는 루프 내부 부피의 대부분을 차지하며 이를 통해 기체 농도의 급격한 변화를 막고 기체가 균일하게 혼합되도록 한다. 믹싱 탱크 내에는 두 개의 블로워와 1번 산소센서, 열전쌍, 압

력계가 설치되어 있다.

- (d) **유량계:** 유량계는 작동 유체의 부피유량을 보여준다. 면적식 유량계를 사용하였으며 측정 범위는 $4\sim 20\text{Nm}^3/\text{h}$ 이다.
- (e) **산소 센서:** 산소센서는 두 곳에 설치되어 있으며 산소의 농도를 측정한다. 1번 산소센서는 믹싱 탱크에, 2번 산소 센서는 테스트 섹션 발달관 직전에 설치되어 있다. 센서는 각각 $0\sim 25\%$, $0\sim 100\%$ 의 측정 범위를 갖는다.

2.3. 실험 방법

실험 절차의 이해에 필요한 밸브와 연결 개략도를 그림 2.6에 나타내었다. 본 실험은 아래와 같은 순서로 진행되었다.

1) 실험 전 설정

1. 실험하고자 하는 파손지름을 가진 테스트섹션을 루프에 결착한다.
2. 모든 고무 캡을 닫는다

2) 루프 내에 헬륨 주입하기

1. 블로워를 이용하여 루프를 순환시킨다.
2. 유량계를 이용해 유량을 확인하며, 이 때 밸브 3은 열려있으며 밸브 1, 2는 닫혀있다.
3. 밸브 1, 2를 모두 열어 준 후 헬륨бом베의 레귤레이터와 밸브 2를 연결한다.
4. бом베의 밸브를 열고 레귤레이터를 서서히 열어 헬륨 주입을 시작한다.
5. 3번 밸브를 닫아 내부의 공기가 헬륨으로 대체될 수 있도록 한다.

6. 내부 산소 분율을 확인하며 원하는 만큼 헬륨을(산소 농도 2~3%까지) 주입한다. 이 과정에서 루프가 가압되지는 않는지 압력계를 확인한다.
7. 헬륨 주입이 완료되면 3번 밸브를 열어주어 루프에 유체가 순환 되도록 한다.
8. 레귤레이터를 잠근 후 보메를 잠근다.
9. 1번, 2번 밸브를 잠근다.
10. 2번 밸브에 연결된 피팅을 풀어준다.
11. 두 산소센서의 수치가 변하지 않을 때까지 기다려 루프 전체에 균일한 농도의 혼합기체가 순환되고 있음을 확인한다.

3) 공기 유입률 측정하기

1. 두 산소센서의 수치가 더 이상 변하지 않아 루프 내부가 평형상태에 도달하면, 실험할 파손각도의 고무캡을 뺐는다.
2. 루프 내의 헬륨, 공기 혼합기체와 외부의 공기가 자연스럽게 교환된다. 이 때 실험실은 반드시 환기되도록 한다. 또한 실험실 내의 자연스러운 공기 흐름이 실험 결과에 영향을 미치지 않도록 테스트 섹션 주변에 간이 격벽을 설치하였다.
3. 약 20분 후 고무 캡을 막는다. 고무 캡을 뺐은 직후와 막은 전후 2~3분간의 산소농도 자료를 제외하여 고무 캡을 뺐고 막는 행위가 실험 결과에 영향을 미치지 않도록 하였다.

4) 공기 분율(산소 농도, 내부 밀도) 올리기

3)번이 종료 되면 고무캡을 막고, 직전 실험보다 더 높은 공기 분율에서 실험하고자 할 경우 본 과정을 수행한다.

1. 1, 2번 밸브를 열어준다.
2. 3번 밸브를 닫아 외부의 공기가 강제로 루프 내로 유입되어 헬륨-공기 혼합기체를 대체하도록 한다.
3. 루프 내의 산소 농도가 필요한 수준에 도달하면 밸브 3을 열어준 후, 밸브 1, 2를 닫는다.

4. 두 산소센서의 수치가 변하지 않을 때까지 기다려 루프 전체에 균일한 농도의 혼합기체가 순환되고 있음을 확인한다.
5. ②~③을 반복하여 해당 파손 크기 및 각도에서 다양한 산소 농도 조건에 대해 실험을 수행한다.

2.4. 자료 분석 방법

실험 과정에서 Data acquisition system(DAS)에 취득된 원본은 **그림 2.7**과 같은 형태로 나타난다. 해당 자료는 2번 산소센서에서 취득된 것이며 공기와 헬륨의 주입에 사용되는 2번 밸브 직후에 위치하기 때문에 주입하는 기체에 따라 빠르게 반응한다.

그림 2.7을 살펴보면 자료 취득 시작 직후 헬륨이 주입되고 있음을 알 수 있다. 주입이 종료되고 루프 내에 균일한 혼합기체가 분포하기까지 약간의 시간이 소요된다. 고무 캡을 연 후 자연스럽게 루프 내외의 기체가 서로 교환되며 내부의 산소농도가 증가한다. 기울기를 구하기에 충분한 자료를 습득하면 고무 캡을 막고 공기를 주입하여 더 높은 산소 농도에서 실험한다. **그림 2.7**에 나타나는 간헐적인 최고점은 공기의 주입이 곧바로 2번 산소센서에 측정되어 나타난 것이다. 고무캡을 열어준 직후와 닫기 직전의 자료를 제외한 일정 구간의 선형 추세선을 계산하여 산소 농도의 시간당 변화율을 **그림 2.8**와 같이 구한다. 이렇게 구한 시간당 산소 변화율은 해당 구간 평균 산소농도에서의 유입률로 이해할 수 있으며 아래와 같이 표현된다.

$$\frac{dC_{O_2}}{dt} \quad (2.1)$$

여기서,

C_{O_2} :루프 내 혼합기체의 산소농도

이 값은 간단한 유도를 통해 다른 유용한 변수로 계산 및 변환하여

사용할 수 있다.

본 연구에서는 실험 장치 외부가 표준상태의 대기로 계속 유지되므로, 밀도 차이는 오직 장치 내부의 밀도에 의해서만 결정된다. 따라서 장치 내부의 밀도를 장치 외부의 밀도인 공기 밀도로 나누어주어 밀도 비(Density ratio)를 정의하면 다음과 같다.

$$\gamma = \frac{\rho_{mixture}}{\rho_{air}} \quad (2.2)$$

여기서,

ρ_{air} : 대기 중 공기 밀도 [kg/m³]

$\rho_{mixture}$: 실험장치 내 헬륨-공기 혼합기체 밀도 [kg/m³]

2.4.1. 공기 유입률 dV_{air}/dt 와 \dot{V}_{in}

2.4.1.1. 유입률별 특징

뒤에서 정의할 두 가지 공기유입률 dV_{air}/dt 와 \dot{V}_{in} 은 유도한 의도에 따라 각기 다른 물리적 의미를 갖는다. [그림 2.9]

(a) 실험장치 내부 공기부피 변화율 dV_{air}/dt (m³/sec)

$$\frac{dV_{air}}{dt} = \frac{V_{total}}{C_{O_2,\infty}} \cdot \frac{dC_{O_2}}{dt} \quad (2.3)$$

실험장치 내부 공기부피 변화율 dV_{air}/dt 는 위와 같이 정의된다. 유도에 따라 이 항은 단위 시간 동안 실험 장치 내부의 공기 부피가 변한 정도를 나타낸다[그림 2.9의 우측]. CFD계산 결과를 이 항으로 나타내면 [그림 2.10]에서 보이는 것과 같이 밀도 비에 따라 2차 함수

형태를 나타내며 감소함을 확인할 수 있다. 이상적인 경우라면 내부 유체가 완전한 공기일 때(산소 농도 20.9%일 때) 이 값은 0을 나타낼 것이다.

(b) 부피 유입률 \dot{V} (부피 유출률, 부피 교환률, m^3/sec)

$$\dot{V}_{in} = \dot{V}_{out} = \dot{V}_{Ex} = \frac{V_{total}}{C_{O_2, \infty} - C_{O_2}} \cdot \frac{dC_{O_2}}{dt} \quad (2.4)$$

부피 유입률은 위와 같이 정의된다. 유도에 따라 이 항은 단위 시간 동안 유입되는 부피를 나타낸다[그림 2.9의 좌측]. 실험 장치 내부는 대기압, 상온 조건으로 유지 되므로 유입되는 부피는 유출되는 부피와 크기가 같다. 따라서 이 부피를 교환되는 부피의 양으로도 생각할 수 있다. CFD계산 결과를 이 항으로 나타내면 [그림 2.11]에서 보는 것과 같이 밀도 비에 따라 1차 함수 형태를 나타내며 감소함을 확인할 수 있다. 실험 결과 또한는 그림 2.12와 같은 형태로 선형의 경향성을 보인다.

2.4.1.2. 유입률 유도

본 실험에서 장치 내부는 오직 공기와 헬륨으로만 채워져 있다. 따라서 장치 내 공기의 물분율은 다음과 같다

$$f_{air} = \frac{C_{O_2}}{C_{O_2, \infty}} \quad (2.5)$$

여기서,

f_{air} : 실험장치 내 공기 물분율

C_{O_2} : 실험장치 내 산소 농도 (%)

$C_{O_2,\infty}$: 대기 중 산소 농도 (%)

또한 헬륨의 몰분율은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_{He} = 1 - f_{air} \quad (2.6)$$

여기서,

f_{He} : 실험장치 내 헬륨 몰분율

이 때 실험장치 내부 공기 부피의 변화율은

$$\frac{dV_{air}}{dt} = V_{total} \cdot \frac{df_{air}}{dt} = \frac{V_{total}}{C_{O_2,\infty}} \cdot \frac{dC_{O_2}}{dt} \quad (2.7)$$

여기서,

V_{total} : 실험장치 총 내부 부피 (m^3)

이다. 이종기체일 때, Dalton의 부분압력 법칙을 이용하면

$$P_{total} = P_{gas1} + P_{gas2} \quad (2.8)$$

여기서,

P_{total} : 혼합기체의 전체 압력

P_{gas1} : 혼합기체 중 기체 1의 부분압력

P_{gas2} : 혼합기체 중 기체 2의 부분압력

이며 실험장치 내부는 대기압 조건으로 유지되므로

$$P_{total} = P_{atm} \quad (2.9)$$

이며, 장치 내의 공기와 헬륨의 부분압력은 몰분율을 통해 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$P_{He} = P_{total} \cdot f_{He} = P_{total} \cdot (1 - f_{air}) \quad (2.10)$$

$$P_{air} = P_{total} \cdot f_{air} \quad (2.11)$$

여기서,

P_{He} : 실험장치 내 헬륨 부분압력

P_{air} : 실험장치 내 공기 부분압력

P_{total} : 실험장치 내부의 압력

따라서 장치 내의 시간당 공기 부분압 변화율은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dP_{air}}{dt} = \frac{d}{dt}(P_{total} \cdot f_{air}) = P_{total} \cdot \frac{df_{air}}{dt} \quad (2.12)$$

실험 동안 장치 내부는 대기압 조건으로 유지되므로, 파손 구멍을 통해 교환되는 기체의 양은 서로 같다.

$$\dot{n}_{in} = \dot{n}_{out} = \dot{n}_{ex} \quad (2.13)$$

여기서,

\dot{n}_{in} : 장치 내부로 시간당 유입되는 공기 분자 개수 [mol/sec]

\dot{n}_{out} : 장치 외부로 시간당 유출되는 혼합기체 개수 [mol/sec]

\dot{n}_{ex} : 파손 구멍을 통해 시간당 교환되는 기체 입자 개수 [mol/sec]

따라서 시간당 장치 내부로 유입되는 공기 분자의 개수는 다음과 같은 과정을 통해 계산할 수 있다. 공기는 단일 기체가 아닌 여러 기체가 섞여있는 혼합기체이므로 엄밀하게는 공기 분자라는 표현은 성립될 수 없으나, 일정 조성비율을 유지한 평균화 된 입자 그룹을 가정한다.

또한 이상기체방정식을 압력의 변화율에 적용하면

$$\frac{dP_{air}}{dt} = \frac{d}{dt}(P_{air}) = \frac{d}{dt}\left(\frac{n_{air}RT}{V_{total}}\right) = \frac{RT}{V_{total}} \cdot \frac{d}{dt}(n_{air}) \quad (2.14)$$

여기서,

n_{air} : 장치 내 총 공기 분자 개수 (mol)

R : 기체 상수 ($8.21 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ atm K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$)

T : 실험장치 내 평균 온도 (K)

실험 장치 내부 공기 분자의 시간에 따른 개수 변화율은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dn_{air}}{dt} = \dot{n}_{in} - f_{air} \dot{n}_{out} \quad (2.15)$$

식 2.15를 식 2.14에 대입하면

$$\frac{dP_{air}}{dt} = \frac{RT}{V_{total}} (\dot{n}_{in} - f_{air} \dot{n}_{out}) = \frac{\dot{n}_{ex} RT}{V_{total}} (1 - f_{air}) \quad (2.16)$$

식 2.12과 2.14는 같은 것을 서로 다르게 표현한 것이다. 따라서 식 2.16는 같은 것을 다른 방식으로 표현한 것이다. 식을 합쳐 정리하면

$$\dot{n}_{in} = \frac{P_{total} V_{total}}{RT(1-f_{air})} \cdot \frac{df_{air}}{dt} = \frac{n_{total}}{1-f_{air}} \cdot \frac{df_{air}}{dt} \quad (2.15)$$

압력과 온도가 일정하게 유지 될 때, 분자의 개수는 부피와 서로 비례하므로 부피유입률은

$$\begin{aligned} \dot{V}_{in} &= \frac{V_{total}}{(1-f_{air})} \cdot \frac{df_{air}}{dt} = \frac{V_{total}}{(1-f_{air})} \cdot \frac{d}{dt} \left(\frac{C_{O_2}}{C_{O_2,\infty}} \right) \\ &= \frac{V_{total}}{C_{O_2,\infty}(1-f_{air})} \cdot \frac{dC_{O_2}}{dt} = \frac{V_{total}}{(C_{O_2,\infty} - C_{O_2})} \cdot \frac{dC_{O_2}}{dt} \end{aligned} \quad (2.16)$$

와 같이 나타낼 수 있다. 또한 실험장치 내부 압력이 대기압 조건으로 유지되므로

$$\dot{V} = \dot{V}_{in} = \dot{V}_{out} = \dot{V}_{exchange} \quad (2.17)$$

따라서 파손 구멍을 통한 질량유량은 다음과 같다

$$\dot{m}_{air} = \rho_{air} \cdot \dot{V}_{in} = \frac{\rho_{air} \cdot V_{total}}{(1-f_{air})} \cdot \frac{df_{air}}{dt} \quad (2.18)$$

여기서,

\dot{m}_{air} : 실험장치 내부로 유입되는 공기의 질량유량 [kg/s]

또한 파손 구멍을 통해 실험장치 내부로 유입되는 평균 유속은 다음과 같다

$$U_{air} = \frac{\dot{m}_{air}}{\rho_{air} \cdot A_{hole,inside}} = \frac{V_{total}}{A_{hole,inside} \cdot (1 - f_{air})} \cdot \frac{df_{air}}{dt} \quad (2.19)$$

여기서,

U_{air} : 실험장치 내부로 유입되는 공기의 평균유속 [m/s]

$A_{hole,inside}$: 파손 구멍의 단면적 중 외부에서 들어오는데 점유되는 면적 [m²]

본 실험에서의 파손은 모두 원형이며 따라서 파손 지름을 통해 단면적을 계산할 수 있다.

$$A_{hole} = \frac{\pi \cdot d_{hole}^2}{4} \quad (2.20)$$

여기서,

d_{hole} : 파손 지름 [m]

2.5. 실험 결과

2.5.1. 밀도 비 효과

밀도 차(부력)는 파손 부위를 통해 공기가 유입되도록 하는 지배동력이다. 실험장치 안과 밖의 밀도 차이에 의한 부력에 의해 파손 부위를 통해 기체가 자연스럽게 교환된다. 또한 실험 장치 내부가 대기압과 동일하게 유지되므로 압력 차에 의한 흐름은 없다.

실험에서는 낮은 밀도 비(큰 밀도 차)에서 더 큰 공기유입률이 나타남을 모든 경우에서 확인할 수 있었다. 이를 통해 유체교환의 지배동력인 부력이 공기유입현상에 주요한 원인임을 확인할 수 있다. 분자의 확산 또한 유체 교환의 주요 원인이지만 부력에 의한 대류에 비해서 그 영향과 속도가 상대적으로 미미하다. [그림 2.13]를 보면 각도에 의해 공기유입률이 달라지고 있음을 확인할 수 있으며 이는 파손 각도에 따라 주요 지배현상이 다르기 때문이다. 이러한 각도에 의한 유입률의 차이는 밀도 비가 작아질수록 더 확연하게 나타나며, 따라서 밀도 차이에 의한 유입 원리를 이해하는 것이 현상 이해에 매우 중요하다고 할 수 있다. 밀도 비가 커짐에 따라 파손각도에 의한 차이는 점점 줄어들게 되는데 이는 구동력이 작아지기 때문이다.

각도에 의한 유입양상을 배제하고 살펴보기 위하여 0도부터 180도까지의 유입률을 평균내어 [그림 2.14]에 나타내었다. 이 자료에서 확인할 수 있는 특징은 다음과 같다.

- 낮은 밀도 비(큰 밀도 차)에서 더 큰 공기 유입률을 갖는다.
- 낮은 밀도 비(큰 밀도 차)에서 각도에 의한 효과가 더 크다.
- dV_{air}/dt 는 밀도 비에 따라 2차 곡선 형태로 감소한다.
- 전 구간에서 90~120도의 유입률이 가장 크다.
- 0도에서의 유입률은 밀도 비에 따른 차이가 거의 없다.
- 밀도 비가 높을(밀도 차가 작을)수록 각도 별 유입률 차이는 점점 적어지며 0.75 이상에서는 상대적으로 매우 적다.

2.5.2. 파손 각도 효과

기존 연구에서 보고된 대로[9], 파손 각도에 따라 유입 현상의 지배 매커니즘이 다르다. 파손 각도 0도에서는 상대적으로 무거운 유체인

공기가 아래쪽에 위치하고 가벼운 유체인 헬륨-공기 혼합기체가 위쪽에 위치하여 안정적이므로 유체의 거시적인 흐름 없이 오직 확산에 의해서 공기가 유입된다. 이 때의 유입률은 다른 파손 각도의 경우에 비하여 상대적으로 느리다. 이후 각도가 증가함에 따라서 층류가 형성되어 유입 속도가 빨라지며, 110~115도에서 최대의 유입률을 갖는다. 110~115도 이후에서는 각도의 증가에 따라 들어오고 나가는 유체의 간섭이 커짐으로 인해 유입률이 점점 감소된다.

그림 2.15에서는 각도의 효과를 살펴보기 위하여 분산을 계산하였다. 평균선에서 벗어난 정도를 통해 각도 변화가 미치는 영향을 알 수 있다. 분산 계산식은 다음과 같다

$$S^2 = \frac{1}{N} \sum (x_i - \bar{x})^2 \quad (2. 21)$$

여기서,

S^2 : 자료들의 분산

N : 자료 개수

x_i : 공기 부피 유입률 [m^3/sec]

\bar{x} : 평균 공기 부피 유입률 [m^3/sec]

분산이 커질수록 평균선에서 많이 떨어져 있음을 의미하며 작을수록 가까운 것을 의미한다. 이에 분산 전체의 총 합을 구하여 밀도 비의 감소(밀도 차의 증가)에 의해 각도 효과가 증가하고 있음을 확인할 수 있었다.

각도에 의한 효과를 조금 더 자세히 살펴보기 위하여 각도에 따른 유입률을 **그림 2.16**에 나타내었다. Spline법을 이용하여 각 점 간의 보간선을 구하였으며 **그림 2.15, 2.16**을 통해 알 수 있는 특징은 다음과 같다.

- 밀도 비가 작을수록(밀도 차가 클수록) 각도에 의한 효과는(각도 별 차이는) 크다.

- 60도의 유입률은 각도 전체의 평균점과 거의 차이가 없다
- 0도부터 110도 까지는 각도의 증가에 따라 유입률이 점점 증가한다.
- 110~120도부터 180도 까지는 각도의 증가에 따라 유입률이 점점 감소한다.
- 유입 최대점은 90~120도 사이로, Spline을 이용하면 110도 부근이다.

2.5.3. 파손 크기 효과

공기 유입률은 파손 크기가 커짐에 따라 유체의 교환 가능한 단면적의 증가로 인해 함께 증가한다 [그림 2.17]. 그러나 파손면적의 증가에 완전히 비례하지는 않는데[그림 2.18], 이는 유입과 유출의 면적이 서로 다르며 이 비율이 밀도 비, 내부 유속 등의 다른 변수에 복합적으로 영향을 받기 때문이다.

또한 각도에 따라 주요 유입 매커니즘과 양상이 조금씩 다르므로 파손 각도에 따라 세 그룹으로 나누어 결과를 살펴보았다. 간헐적 유입이 지배적인 180도, 층류가 나타나는 60~150도, 그리고 확산이 우세한 0도와 더불어 30도의 경우를 따로 살펴보았다. 실험 결과에서 나타난 특징은 다음과 같다.

● 공통 특징

- 파손 면적이 증가함에 따라 유입률은 증가한다.

● 60~150도 [그림 2.17, 2.18]

- 면적의 증가에 따라 유입률은 거의 비례하여 증가한다.
- 낮은 밀도 비(큰 밀도 차)에서는 면적의 증가율에 비해 유입률의 증가율이 더 적다.
- 큰 밀도 비(작은 밀도 차)에서는 면적의 증가율 보다 유입률의 증가율이 더 크다.

● 180도 [그림 2.19]

- 밀도 비 0.6 이하에서 유입률은 면적의 증가에 따라 증가한다
- 밀도 비 0.6 이상에서 유입률은 면적의 증가에 거의 영향을 받지 않는다.

● 30도 [그림 2.20]

- 면적의 증가에 따라 유입률은 증가한다.
- 밀도 비 0.75 이상에서는 면적의 증가에 따른 유입률 차이가 미미하다.

● 0도 [그림 2.21]

- 전체 밀도 비 구간에서 다른 각도에서의 파손에 비해 유입률이 매우 작다.
- 작은 밀도 비(큰 밀도 차)에서 더 큰 유입률을 갖는다.
- 0.2의 작은 밀도 비(큰 밀도 차)에서는 면적 증가에 따른 효과가 있는 것처럼 보이나, 밀도 비가 그 이상 커짐에 따라 면적에 의한 효과는 미미하다.

2.5.4. 내부 유속 효과

내부 유속으로 인한 효과는 내부 관성력이 유입률에 미치는 영향으로 이해할 수 있다. 때문에 각기 다른 파손 각도의 각기 다른 유입 매커니즘에 따라 내부 유속으로 인한 효과가 다르게 나타난다.

유속 증가에 따른 유입률 변화를 살펴보기 위하여 지름 18mm인 경우의 유입률- dV_{air}/dt 를 유속 0.275m/s, 0.370m/s 에서 **그림 2.22**과 **그림 2.24**에 각각 나타내었다. 실험한 밀도 비 값이 조금씩 다르므로 이를 좀 더 적절히 비교하기 위하여 MATLAB 프로그램을 이용해 동일한 밀도 비에 대해 Spline 보간법을 이용, 계산하였다. 이중 지름 18mm의 값을 **그림 2.23**와 **그림 2.25**에 나타내었으며 계산한 유속 증가에 따른 변화율을 **표 2.5**와 **표 2.6**에 나타내었다. 실험 결과에서 나타난 특징은 다음과 같다.

- 밀도 차가 지배적인 공기 유입 현상은 내부 관성력의 증가에 따라 유입률이 감소한다.
 - 밀도 차에 의한 유입이 지배적인 경우, 유속의 증가에 따라 유입률은 감소한다. 이 때, 유입률의 감소 정도는 상대적으로 작다.
 - 밀도 차에 의한 유입이 지배적인 경우, 특정 유속에서 유입률이 매우 크게 감소하는 지점이 존재한다. 이 지점은 밀도 비, 파손 크기 등에 따라 각기 다르다.
 - 해당 지점을 지난 후, 유입 현상은 내부 관성력의 증가에 따라 유입률이 증가한다.
- 밀도 차가 지배적이지 않은 공기 유입 현상은 내부 관성력의 증가에 따라 유입률이 증가한다.
 - 파손 각도 0도와 30도의 경우, 거의 모든 구간에서 유속 증가에 따라 유입률이 증가하였다.
 - 이 때의 유입률은 매우 작아, 확산과 뿐만 아니라 파손 구멍 주변의 관성력 등이 유체의 교환에 영향을 미치는 것으로 보인다.

관찰한 현상을 바탕으로, 밀도 차에 의한 유입이 지배적인 60~150도와 확산이 주요한 0, 30도의 두 그룹으로 나누어 그룹별로 실험 결과의 유입률 평균을 낸 후 살펴보았다.

- 실험의 경우, 밀도 차에 의한 유입이 지배적인 그룹은 낮은 밀도 비(큰 밀도 차) 구간에서 유속 증가에 따라 ($0.270\text{m/s} \sim 0.435\text{m/s}$) 유입률이 평균적으로 감소하였다 [그림 2.26].
- 또한 큰 밀도 비(작은 밀도 차) 구간에서는 유속 증가에 따라 유입률이 평균적으로 증가하였다.
- 실험에서 확산이 주요한 그룹은 전체 구간에서 유속 증가에 따라 유입률이 평균적으로 증가하였다 [그림 2.27].

실험 결과를 통해 내부 유속에 의한 공기유입률 영향이 밀도 비, 파손 지름과 밀접하게 연관되어 있는 것을 확인 할 수 있었다. 이는 4단원의 모델 개발에서 자세하게 다루었다.

2.6. 토의

본 실험에서는 공기유입현상의 주요 변수인 1)파손 각도, 2)파손 크기, 3)내부 유속, 4)밀도 차 네 가지 변수의 변화에 따른 산소변화율을 취득하였다. 취득된 산소변화율은 유도에 따라 크게 두 가지 다른 유입률로 유도하여 사용할 수 있다. 공기 부피 변화율 dV_{air}/dt 은 단위시간당 실험장치 내부에서 공기가 차지하는 면적의 변화율을 나타내며, 부피 유입률 \dot{V} 은 단위 시간당 실험 장치 내/외로 교환되는 부피를 나타낸다.

공기 유입률은 변수 조건에 따라 각각 달라졌다. 전체적인 경향성은 다음과 같다.

- 밀도 비가 감소하면(밀도 차가 증가하면) 유입률은 증가한다.
- 각도가 0도에서 120도까지 증가할 때 유입률은 증가한다. 이후 120도에서 180도까지는 오히려 유입률이 감소하는데, 이는 유입 매커니즘의 변화 때문이다.
- 밀도 비가 작을(밀도 차가 클)수록 각도의 효과가 크다.
- 내부 유속은 관성력과 관계되어 있으며 유입 현상은 부력과 관성력의 우세정도에 따라 지배 현상이 다르다.
- 내부 유속이 증가하면 층류를 이루며 유입되는 60~150도의 유입률은 감소하며, 0~30도의 유입률은 증가한다. 그러나 이 변화 정도는 상대적으로 다른 변수들의 영향에 비해 미미하다.
- 파손 면적은 교환 면적의 증가와 관련되어 부력이 미치는 영향과 밀접하게 관계된다.
- 파손 면적의 증가는 유입률을 증가시킨다.

- 관성력이 유입 현상에 지배적인 영역에서는 유속의 증가에 따라 유입률이 증가한다. 이는 베르누이의 원리에 의한 것으로 예상된다.
- 약 0.7 이상의 높은 밀도 비(낮은 밀도 차) 구간에서의 유입률은 대체로 각도에 의한 구분이 어려우며 이는 부력의 영향이 약하고 관성력이 크게 작용하기 때문일 것으로 예상된다.
- 3mm, 6mm 등의 작은 파손 지름에서는 각도에 의한 유입률 차이가 두드러지지 않으며 이 또한 부력의 영향이 충분히 작용할만한 교환 표면적이 형성되지 않아 파손 주변에서 관성력이 크게 작용하기 때문일 것으로 예상된다.

표 2.1 실제 사고 대비 실험 설계 변수

		실제 사고	실험
파손 위치		원자로상부계측설비관, 기체샘플링,정화관, 제어봉 및 방사선 조사 임상관, 중간열교환기, 헬륨보조계통 ,	지름 9.8cm 파이프
파손 크기		1/2"(3.23cm ²) 이하	0.09, 0.36, 1.44, 2.25, 3.24 cm ²
온도	노 내	400~950℃	상온
	노 외	상온	상온~200℃
압력		1기압 (감압 후)	1기압
밀도 비 $\gamma = \frac{\rho_{mixture(Loop)}}{\rho_{Air(Atmosphere)}}$		0.034(100%He, 950℃) ~1(100%Air)	0.25~0.85
$Fr_{criteria} = \frac{U_{inside}}{\sqrt{\frac{\rho_{air} - \rho_{mixture}}{\rho_{air} + \rho_{mixture}} g D_{hole}}}$ (Main flow inertia vs Buoyancy)		0 ~ ∞ (Natural convection)	1.27 ~ ∞
Break angle [deg]		0~180 : depend on various situation, Instrumentation line break (120~180) Sampling line break (0~180)	0, 30, 60, 90, 120, 150, 180

표 2.2 실험 Test Matrix 1

케이스 번호	파손 지름 [mm]	내부 유속 [m/s]	파손 각도 [deg]	산소 농도 [%]
1	3	0.275	180	3, 8, 12, 16, 18 주변
2			150	
3			120	
4			90	
5			60	
6			30	
7			0	
8		0.370	180	
9			150	
10			120	
11			90	
12			60	
13			30	
14			0	
15		0.435	180	
16			150	
17			120	
18			90	
19			60	
20			30	
21			0	
22	6	0.275	180	
23			150	
24			120	
25			90	
26			60	
27			30	
28			0	
29		0.370	180	
30			150	
31			120	
32			90	
33			60	
34			30	
35			0	

표 2.3 실험 Test Matrix 2

케이스 번호	파손 지름 [mm]	내부 유속 [m/s]	파손 각도 [deg]	산소 농도 [%]
36	6	0.435	180	3, 8, 12, 16, 18 주변
37			150	
38			120	
39			90	
40			60	
41			30	
42			0	
43	12	0.270	180	
44			150	
45			120	
46			90	
47			60	
48			30	
49			0	
50		0.370	180	
51			0.435	
52			0.275	
53			90	
54			60	
55			30	
56			0	
57		0.435	180	
58			0.370	
59			120	
60			90	
61			60	
62			30	
63			0	
64	15	0.270	180	
65			150	
66			120	
67			90	
68			60	
69			30	
70			0	

표 2.4 실험 Test Matrix 3

케이스 번호	파손 지름 [mm]	내부 유속 [m/s]	파손 각도 [deg]	산소 농도 [%]
71	15	0.370	180	3, 8, 12, 16, 18 주변
72			150	
73			120	
74			90	
75			60	
76			30	
77			0	
78		0.435	180	
79			150	
80			120	
81			90	
82			60	
83			30	
84			0	
85	18	0.270	180	
86			0.435	
87			0.275	
88			90	
89			60	
90			30	
91			0	
92		0.370	180	
93			0.370	
94			120	
95			90	
96			60	
97			30	
98			0	
99		0.435	180	
100			150	
101			120	
102			90	
103			60	
104			30	
105			0	

표 2.5 유속 변화 (0.275m/s → 0.370m/s)에 따른 유입률 dV_{air}/dt
변화율 (실험)

밀도 비 각도	0.25	0.45	0.6	0.75	0.9
180도	-0.81%	-6.33%	32.76%	21.50%	53.39%
150도	0.72%	-2.82%	-0.08%	-3.42%	15.62%
120도	2.18%	-10.30%	-7.71%	4.10%	20.95%
90도	-1.72%	-10.46%	-4.64%	-6.57%	46.16%
60도	-0.98%	-0.90%	-6.05%	-1.10%	15.29%
30도	-2.77%	12.00%	17.67%	3.69%	27.10%
0도	21.36%	25.24%	25.46%	43.32%	-20.82%

표 2.6 유속 변화 (0.370m/s → 0.430m/s)에 따른 유입률 dV_{air}/dt
변화율 (실험)

밀도 비 각도	0.25	0.45	0.6	0.75	0.9
180도	-28.58%	29.76%	22.88%	24.46%	43.99%
150도	-41.01%	-9.86%	2.77%	14.77%	45.30%
120도	-39.56%	-9.70%	4.21%	0.26%	49.40%
90도	-38.28%	0.00%	6.24%	24.79%	40.14%
60도	-35.79%	-7.21%	11.35%	8.46%	90.53%
30도	-7.39%	14.22%	15.80%	55.55%	-86.59%
0도	12.61%	4.23%	14.03%	-7.05%	83.89%

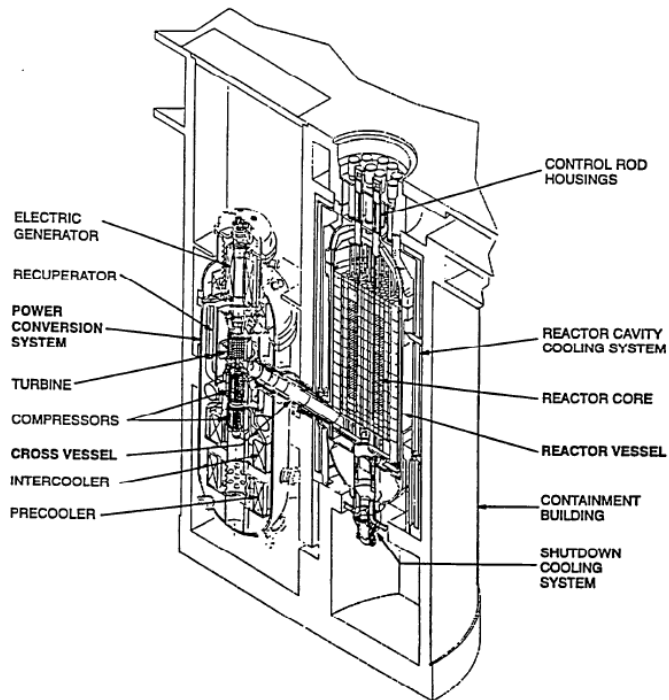


그림 2.1 General Atomic사 GT-MHR 소내 개략도

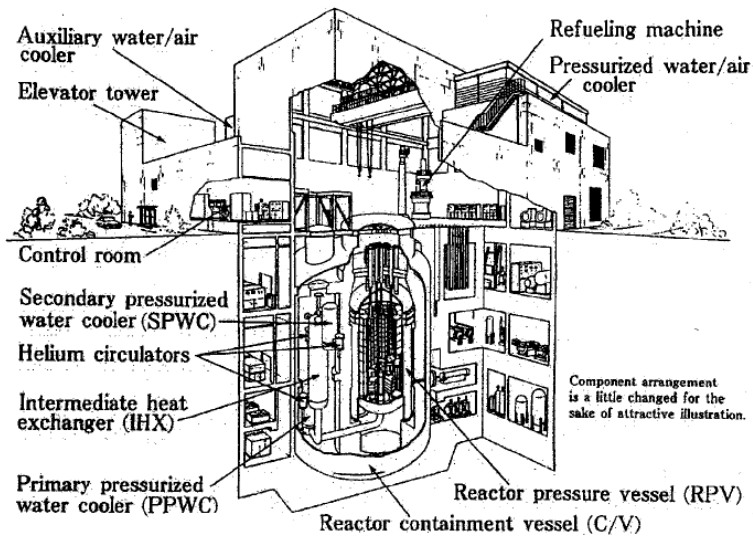


그림 2.2 일본 JAEA의 HTTR 소내 개략도

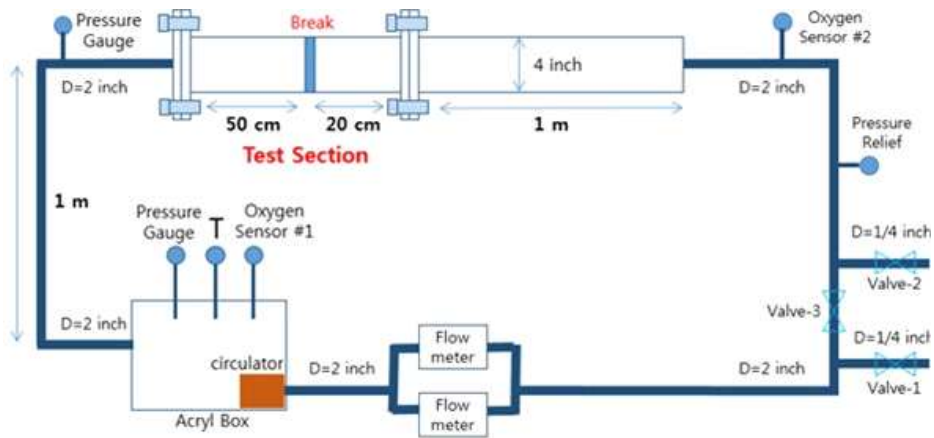


그림 2.3 실험장치 개략도

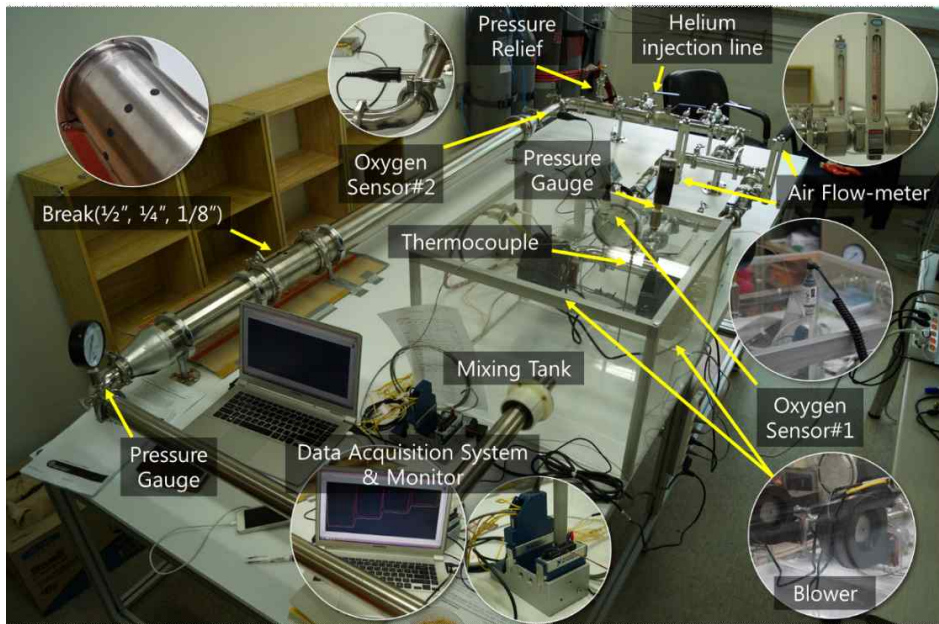


그림 2.4 실험장치 전경도

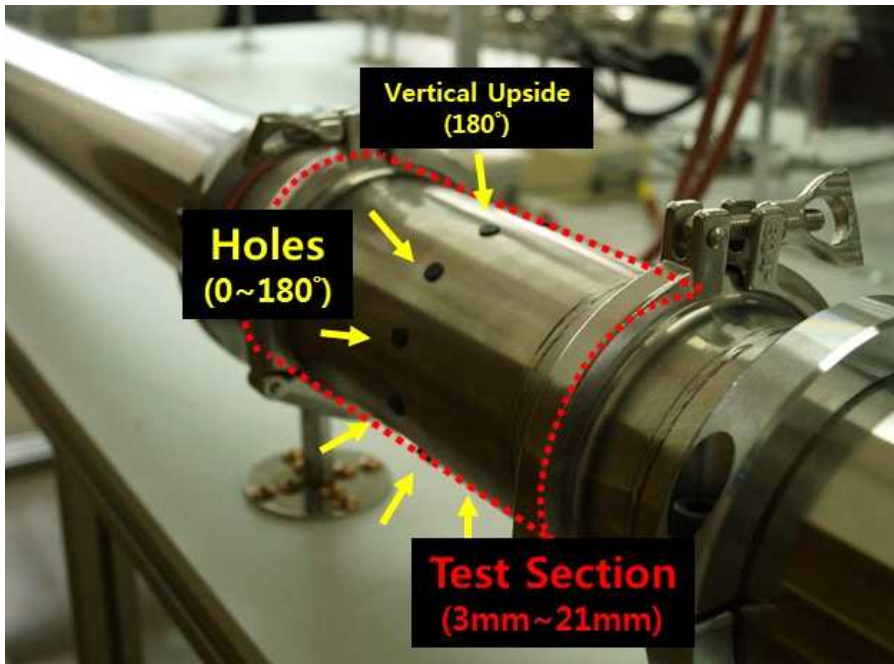
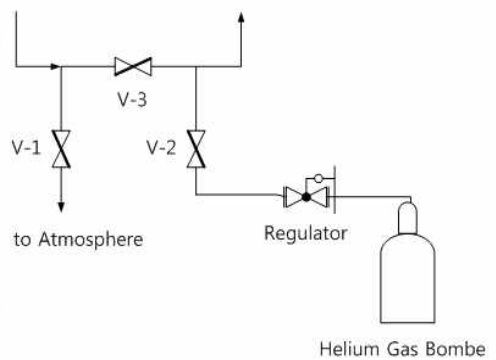


그림 2.5 Test-section



(좌 : 1,2번 밸브 닫힘, 3번 밸브 열림, 우 : 루프-봄베 연결 개략도)

그림 2.6 루프 내 밸브 구성

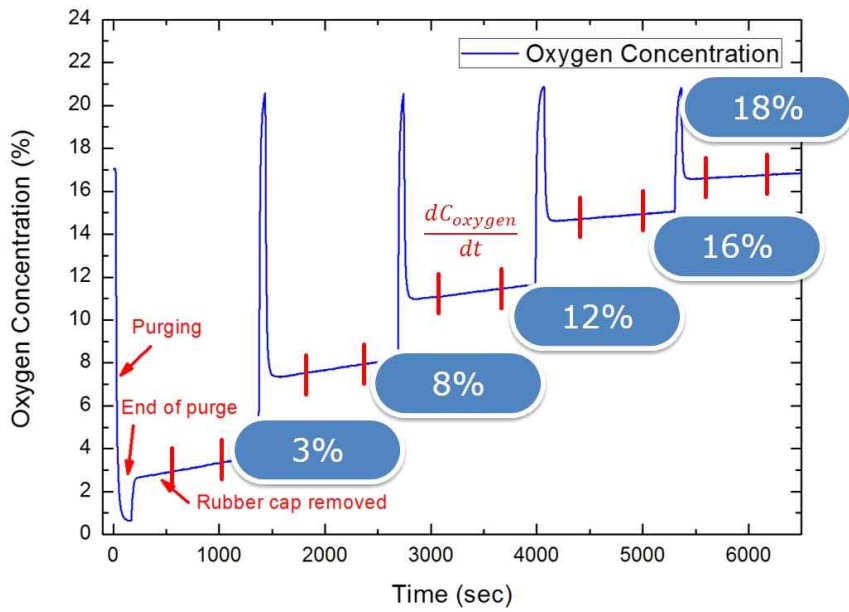


그림 2.7 산소 농도 취득 자료 (2번 산소센서)

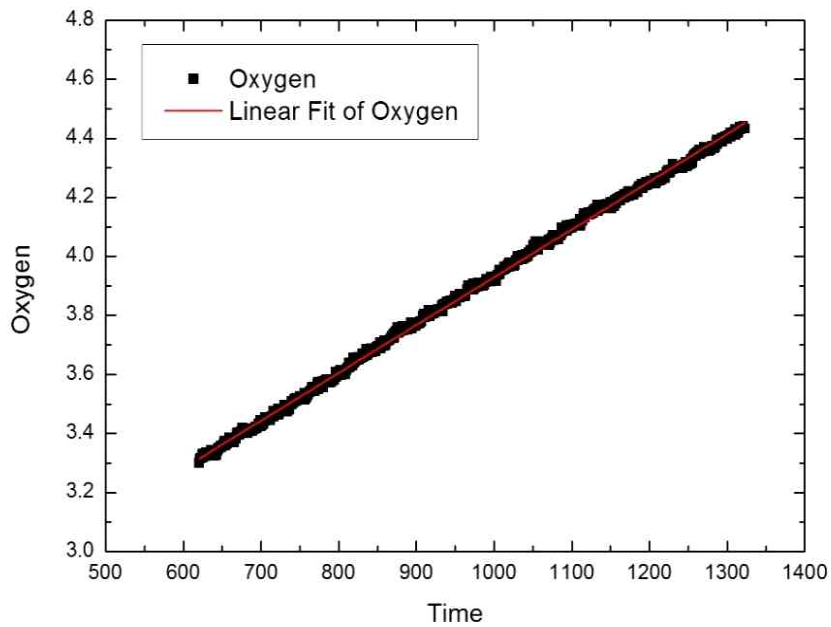


그림 2.8 농도변화 기울기 취득 구간 예시 (D=15mm, V=0.370m/s, 120deg, 산소농도 3.9%)

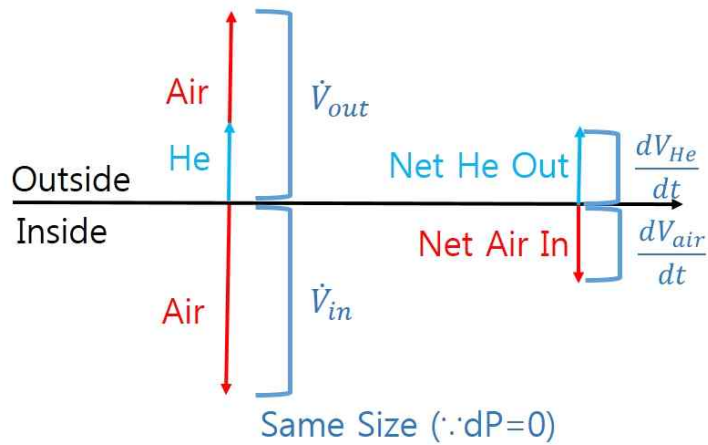


그림 2.9 dV_{air}/dt 와 \dot{V} 의 물리적 의미

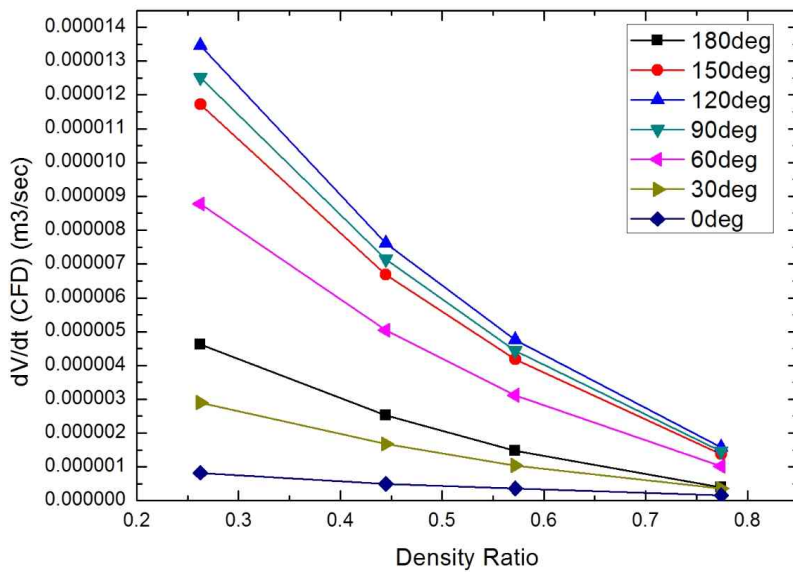


그림 2.10 dV_{air}/dt vs 밀도 비 (D=15mm, U=0m/s CFD)

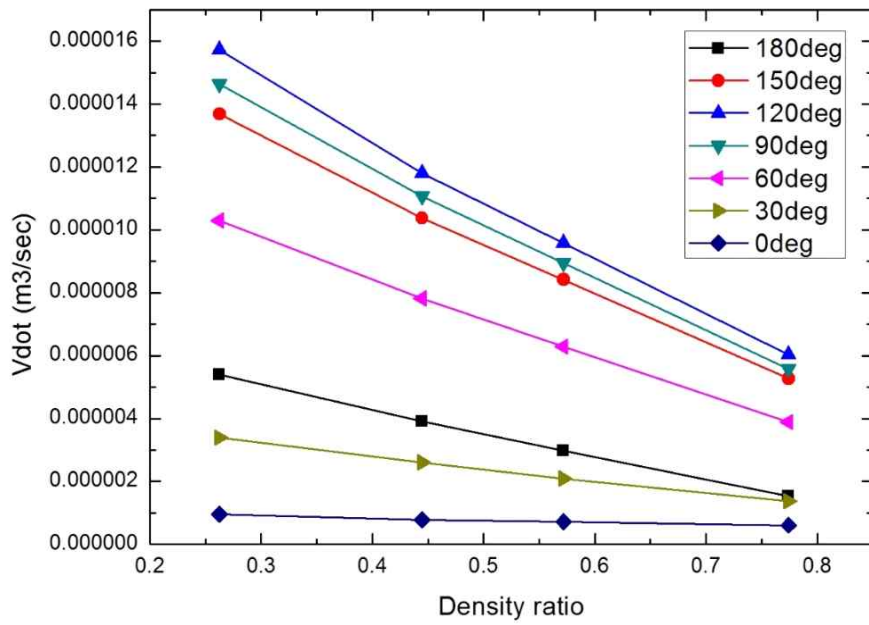


그림 2.11 \dot{V} vs 밀도 비 ($D=15\text{mm}$, $U=0\text{m/s}$ CFD)

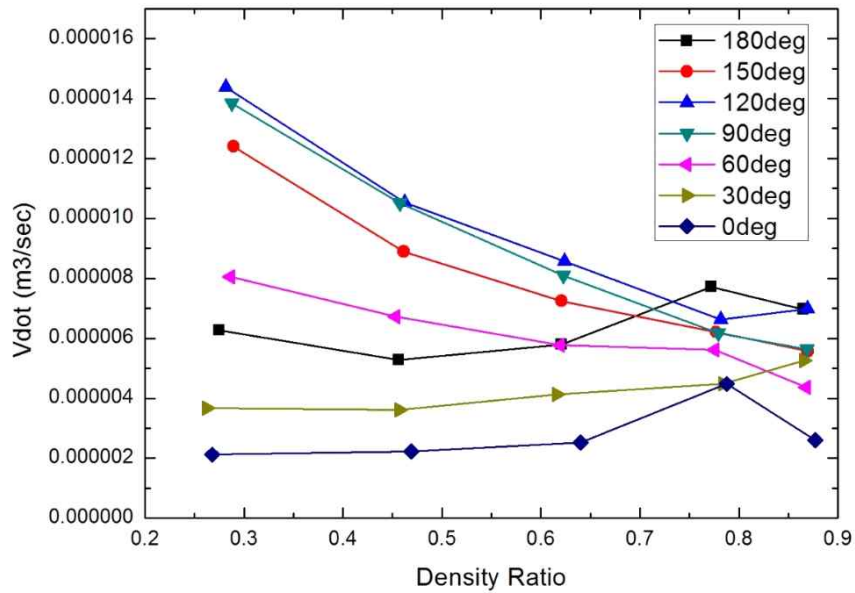


그림 2.12 \dot{V} vs 밀도 비 ($D=15\text{mm}$, $U=0.275\text{m/s}$, 실험)

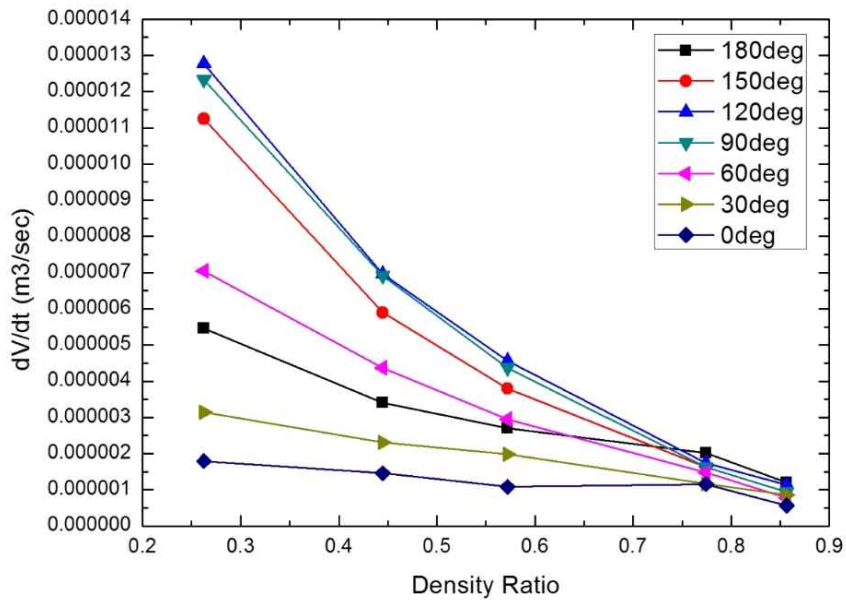


그림 2.13 dV_{air}/dt vs 밀도 비 ($D=15\text{mm}$, $U=0.275\text{m/s}$, 실험, 보간)

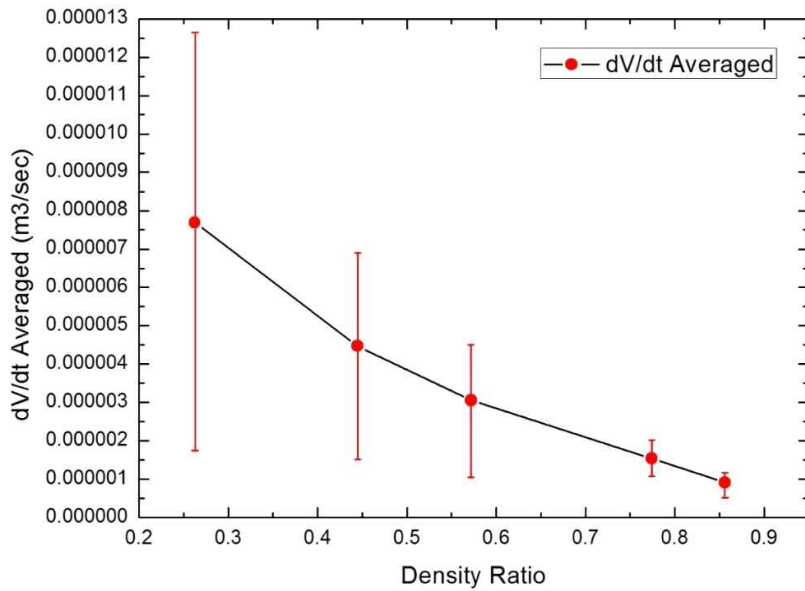


그림 2.14 평균 dV_{air}/dt vs 밀도 비 ($D=15\text{mm}$, $U=0.275\text{m/s}$, 보간)

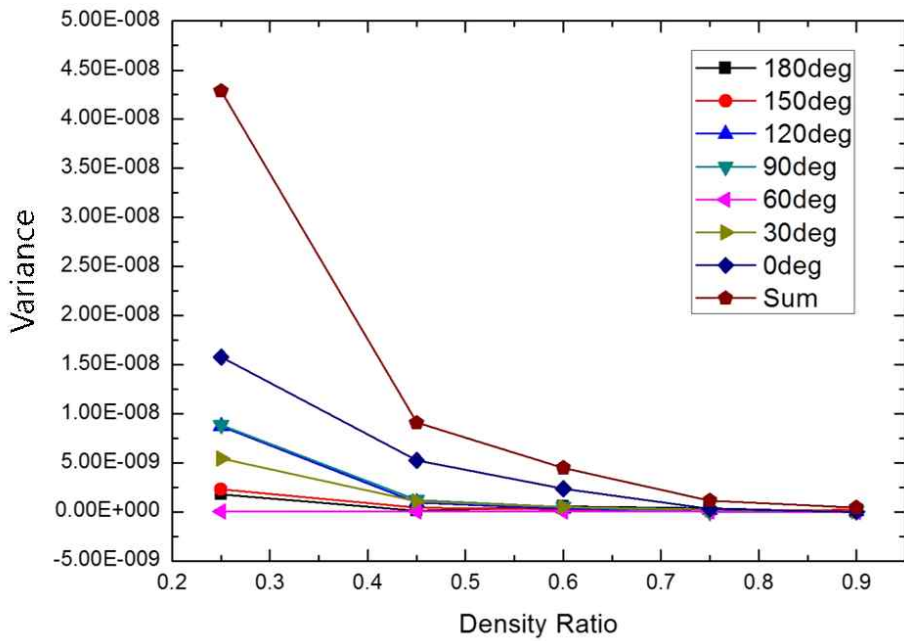


그림 2.15 분산 vs 밀도 비 ($D=12\text{mm}$, $U=0.370\text{m/s}$, 실험)

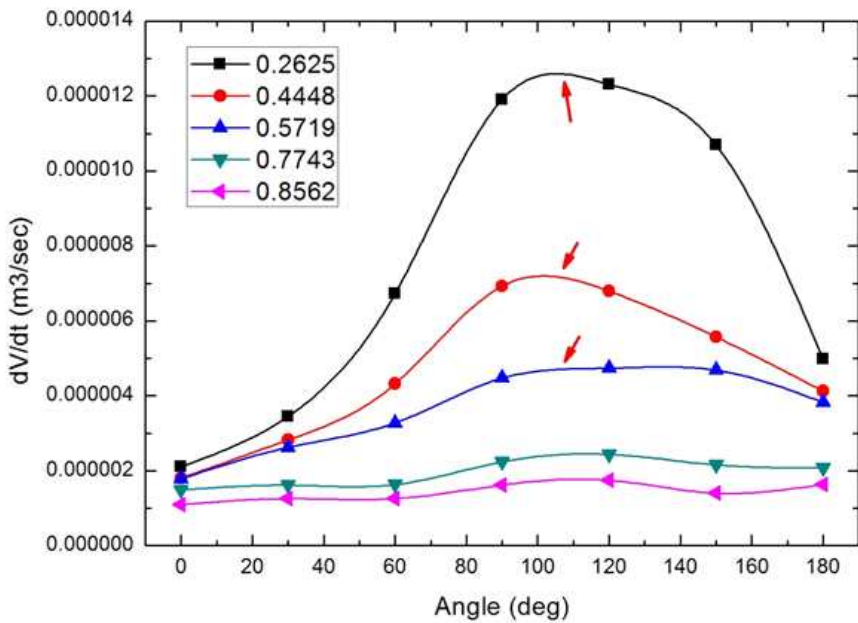


그림 2.16 dV_{air}/dt vs 각도 ($D=15\text{mm}$, $U=0.370\text{m/s}$, 실험)

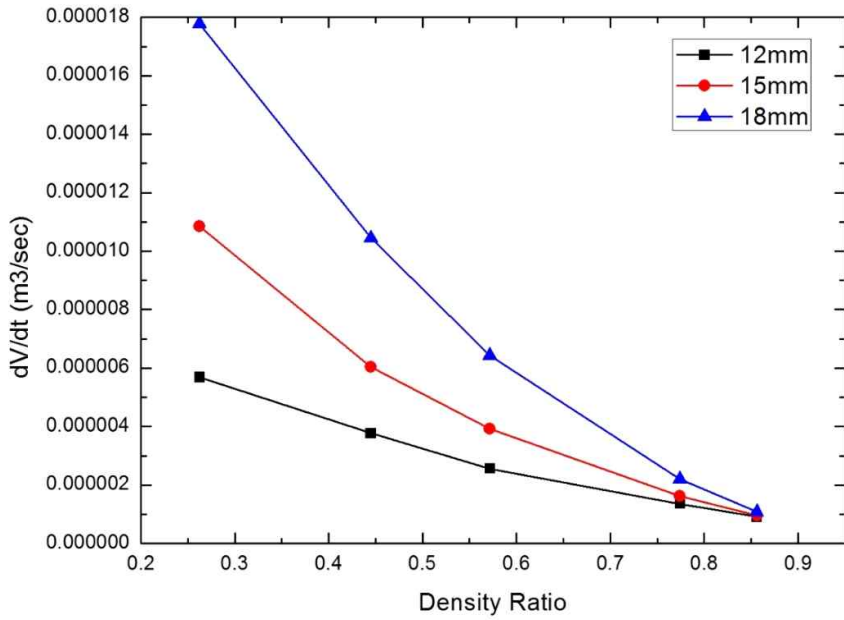


그림 2.17 dV_{air}/dt vs 밀도 비 (0.270m/s, 60~150도 평균, 실험)

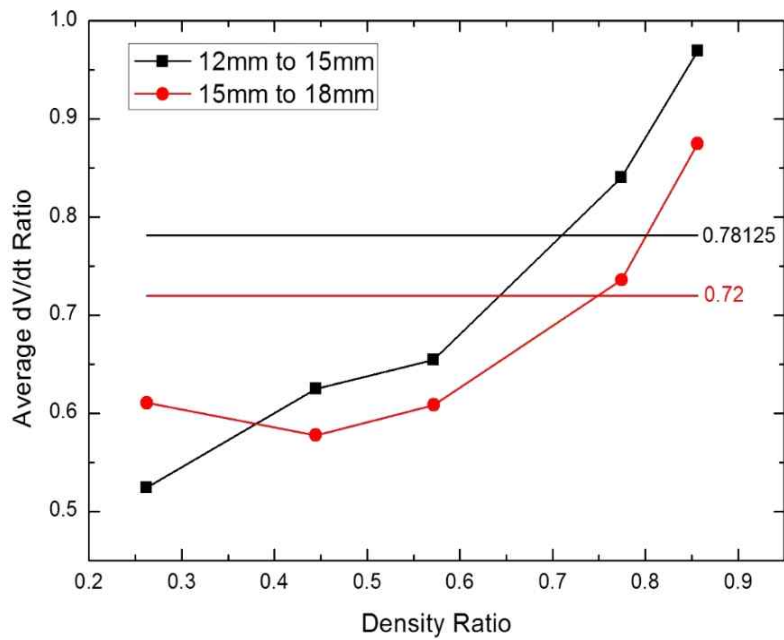


그림 2.18 면적 증가에 대한 유입률 증가율 비교, dV_{air}/dt vs 밀도 비 (0.270m/s, 60~150도 평균, 실험)

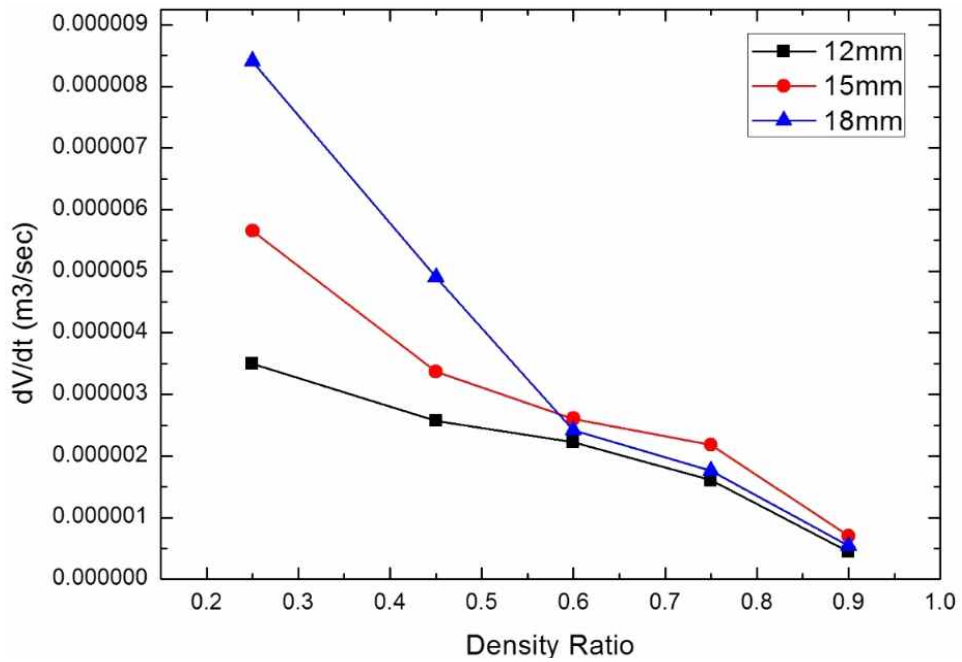


그림 2.19 dV_{air}/dt vs 밀도 비 ($U=0.270\text{m/s}$ 180도, 실험)

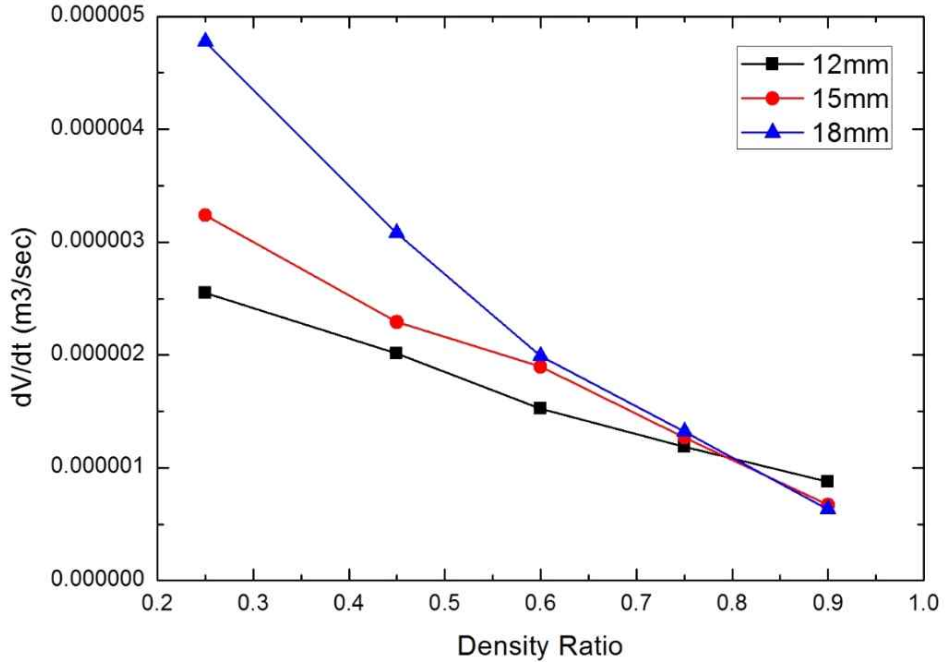


그림 2.20 dV_{air}/dt vs 밀도 비 ($U=0.270\text{m/s}$ 30도, 실험)

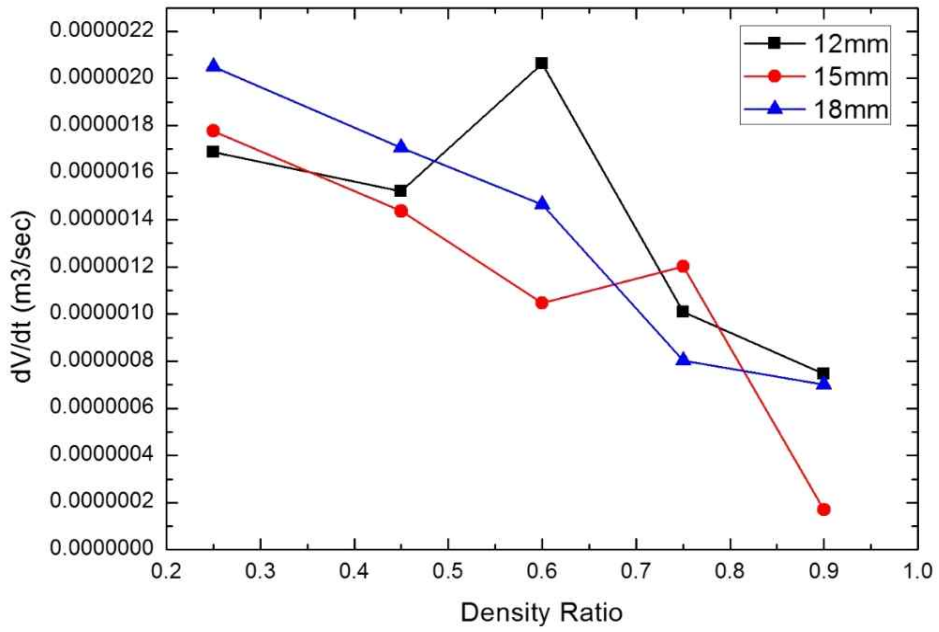


그림 2.21 dV_{air}/dt vs 밀도 비 ($U=0.270$ m/s 0도, 실험)

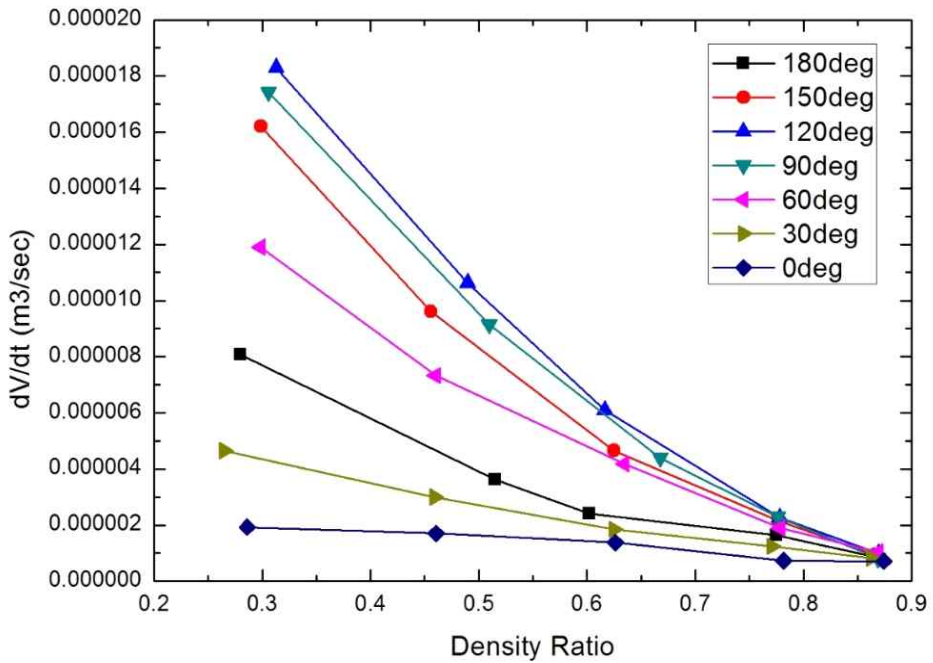


그림 2.22 보간 전 dV_{air}/dt ($D=18$ mm, $U=0.275$ m/s, 실험)

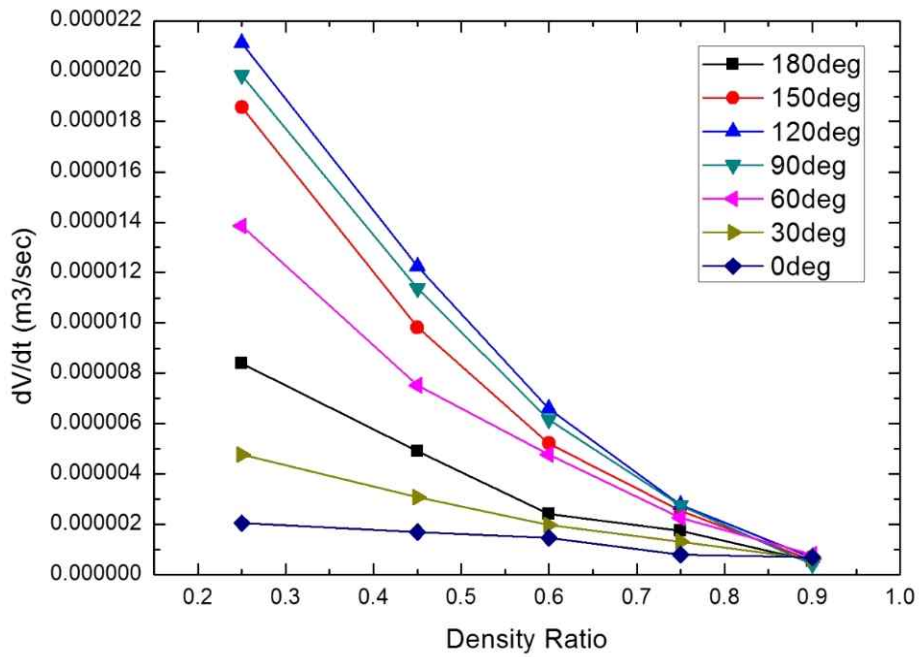


그림 2.23 보간 후 dV_{air}/dt (D=18mm, U=0.275m/s, 실험)

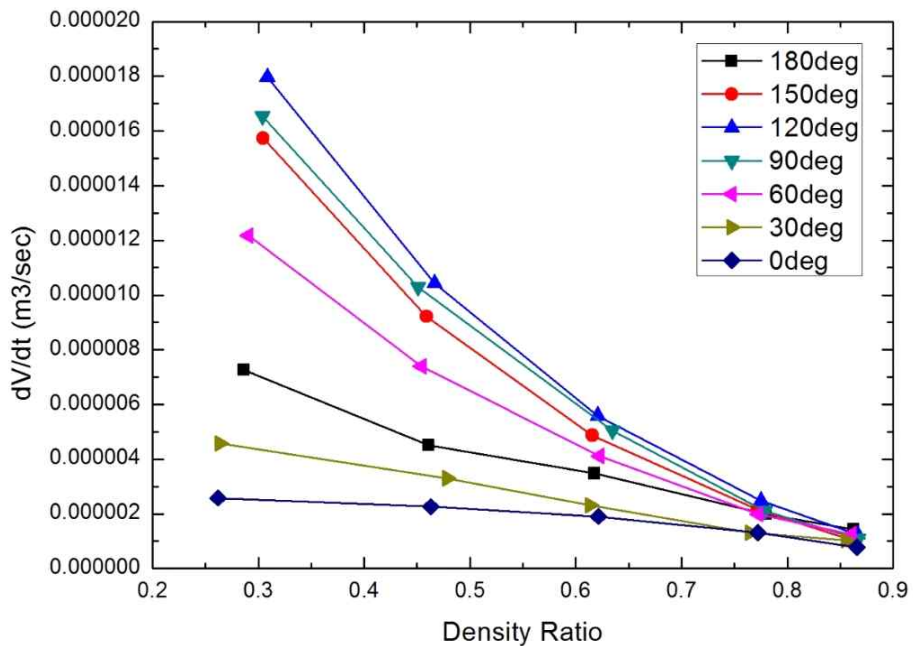


그림 2.24 보간 전 dV_{air}/dt (D=18mm, U=0.370m/s, 실험)

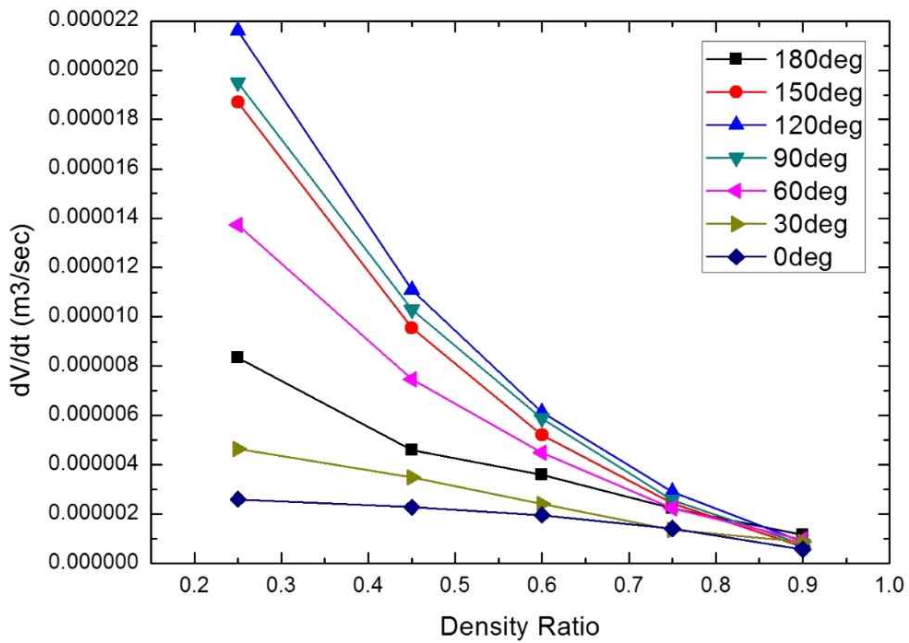


그림 2.25 보간 후 dV_{air}/dt ($D=18\text{mm}$, $U=0.370\text{m/s}$, 실험)

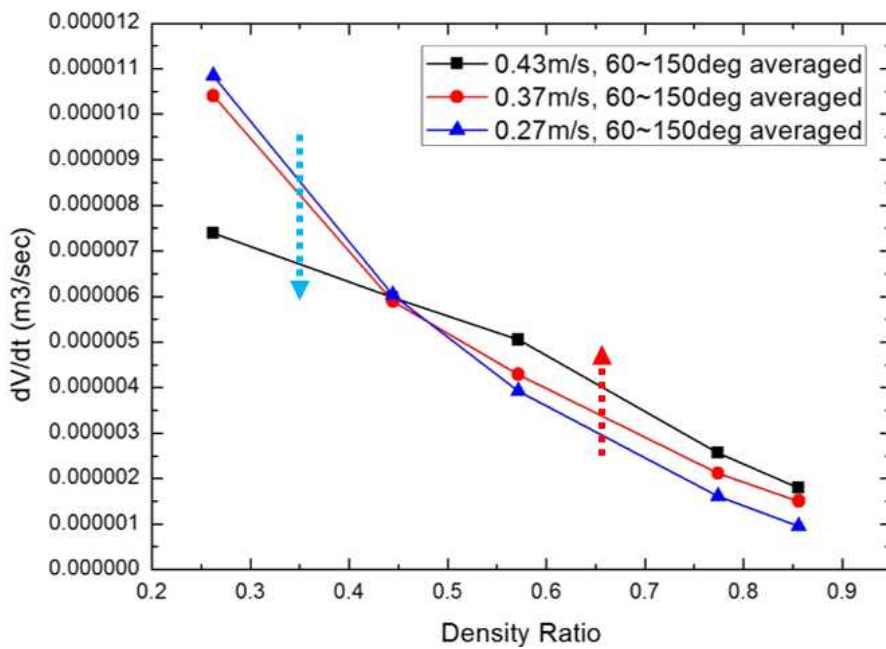


그림 2.26 유속 변화에 따른 60~150도 평균 dV_{air}/dt vs 밀도 비 ($D=15\text{mm}$, 실험)

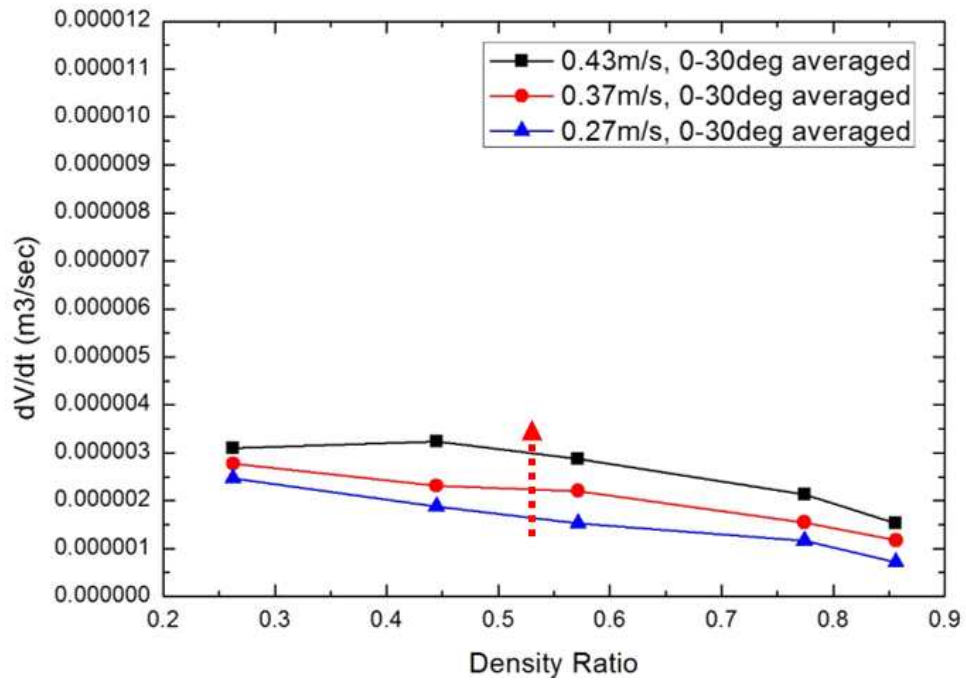


그림 2.27 유속 변화에 따른 0, 30도 평균 dV_{air}/dt vs 밀도 비
(D=15mm, 실험)

3. 소형파단 공기유입 전산유체 해석

3.1. 해석 모델

3.1.1. 형상 및 격자 모델

본 연구에서는 실험 결과를 뒷받침하고 현상을 이해하기 위하여 전산유체해석(Computational Fluid Dynamics, CFD) 기법을 사용하였다. 해석에는 상용 CFD 코드인 Ansys사의 CFX 14.0을 사용하였으며 실제 실험 장치와 동일한 형태로 지름 9.8cm의 원형 관 모델을 모사하여[그림 3.1] 유입률을 계산, 직접 비교하였다. 모델 제작과 메쉬 생성에는 Gambit 2.2.30을 사용하였으며 메쉬 통계를 표 3.1에 나타내었다. 격자는 총 654,403개의 Tetrahedra로 짜여졌으며[그림 3.2], 파손 구멍 주변의 격자는 더 조밀하게 구성하였다[그림 3.3]. Laminar 조건에서 3.5초간의 과도 계산(transient)이 0.01초의 Time step을 갖고 수행되었으며 실험과 마찬가지로 내부 관에 공기-헬륨 혼합기체를 흘려 준 후 자연스럽게 부력 및 확산에 의해 교환되는 유체의 양을 계산하였다.

계산한 모델은 총 161가지로, 15mm의 파손 지름에서 일곱 개 각도(0, 30, 60, 90, 120, 150, 180도), 다섯 개 유속(0, 0.1, 0.275, 0.370, 0.430m/s), 네 가지 산소농도 (3.03%, 7.47%, 10.57%, 15.5%)에 대해 계산을 수행하였다. 또한 공기가 최대 유입되는 각도를 계산하기 위하여 90~120도의 사이에서는 5도 간격으로 (95, 100, 105, 110, 115도) 더 조밀하게 계산을 실시하여 최대 유입 각도를 확인하였다. 계산한 모델들을 표 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6에 유속 별로 나타내었다.

3.1.2. 물리 모델

적절한 계산을 위해서는 본 현상에서 주요한 공기 유입 원인인 부력과 확산을 모두 고려하여야 한다. 본 해석에서는 부력 모델과 수송방정식을 이용하여 계산하였다.

3.1.2.1. 기본 지배 방정식

Ansys CFX 14.0에서 사용하는 질량, 운동량, 에너지 보존 식은 다음과 같다.[12]

1) 질량보존식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0 \quad (3.1)$$

2) 운동량 보존식

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \times \mathbf{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \mathbf{S}_M \quad (3.2)$$

여기서

$$\boldsymbol{\tau} = \mu \left(\nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T - \frac{2}{3} \nabla \cdot \mathbf{U} \right) \quad (3.3)$$

3) 에너지 보존식

$$\frac{\partial(\rho h_{total})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} h_{total}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (\mathbf{U} \cdot \boldsymbol{\tau}) + \mathbf{U} \cdot \mathbf{S}_M + \mathbf{S}_E \quad (3.4)$$

$$h_{total} = h + \frac{1}{2} \mathbf{U}^2 \quad (3.5)$$

$\nabla \cdot (\mathbf{U} \cdot \boldsymbol{\tau})$: 마찰력에 의한 일

$\mathbf{U} \cdot \mathbf{S}_M$: 외부 운동량에 의한 일

4) 상태 방정식

$$\rho = \rho(p, T) \quad (3.6)$$

$$dh = \left. \frac{\partial h}{\partial T} \right|_p dT + \left. \frac{\partial h}{\partial p} \right|_T dp = c_p dT + \left. \frac{\partial h}{\partial p} \right|_T dp \quad (3.7)$$

$$c_p = c_p(p, T) \quad (3.8)$$

5) 이상기체 상태방정식

$$\rho = \frac{wp_{abs}}{R_0 T} \quad (3.9)$$

$$dh = c_p dt \quad (3.10)$$

$$c_p = c_p(T) \quad (3.11)$$

여기서,

w : 분자량

p_{abs} : 절대압력 [atm]

R_0 : 기체 상수

3.1.2.2. 부력 모델

Ansys사의 CFX 14.0에서 부력모델은 운동량 보존방정식에 아래 식을 적용하여 계산한다.

$$S_{M, buoyancy} = (\rho - \rho_{ref})g \quad (3.12)$$

여기서,

ρ_{ref} : 기준 밀도 [kg/m³]

또한 부력 모델에서는 운동량 보존방정식의 압력 텀에 ρ_{ref} 에 의한 유체정역학적 구배를 고려하며 식은 다음과 같다.

$$p_{abs} = p + p_{ref} + \rho_{ref} \vec{g}(\vec{r} - \vec{r}_{ref}) \quad (3.13)$$

여기서,

\vec{r}_{ref} : 부력 기준 위치

본 연구에서는 Full Buoyancy 모델을 이용하여 다양한 밀도에서의 부력 계산에서 $\rho - \rho_{ref}$ 를 직접 계산한다. 이 설정은 다중(Multicomponent)유동, 다상(Multiphase)유동 등에 주로 적용된다.

3.1.2.3. 수송 방정식

다중(Multicomponent) 유체에서 속도, 압력, 온도 등 여러 물리량을 구하기 위하여 스칼라 수송방정식을 계산한다. 이 때 각 기체종(component)은 각각의 보존 방정식(질량, 운동량, 에너지)을 가지며 Reynolds-averaging을 이용한다. 식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \tilde{\rho}_i}{\partial t} + \frac{\partial(\tilde{\rho}_i \tilde{\mathbf{U}}_j)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho_i (\tilde{\mathbf{U}}_{ij} - \tilde{\mathbf{U}}_j) - \overline{\rho_i \mathbf{U}_j} \right) \quad (3.14)$$

$$\tilde{\mathbf{U}}_j = \frac{\sum \tilde{\rho}_i \tilde{\mathbf{U}}_{ij}}{\bar{\rho}} \quad (\text{질량평균 속도}) \quad (3.15)$$

$$\rho_i (\tilde{\mathbf{U}}_{ij} - \tilde{\mathbf{U}}_j) = -\frac{\rho D_i}{\bar{\rho}} \frac{\partial \tilde{\rho}_i}{\partial x_j} \quad (\text{상대 질량 플럭스}) \quad (3.16)$$

여기서,

$\tilde{\rho}_i$: 핵종 i의 질량평균 밀도

D_i : Kinematic Diffusivity

3.1.3. 물성치

각 기체의 물성치는 상용 CFD 코드인 CFX 14.0에 기본적으로

내장된 것을 이용하였다. ‘Air at 25℃’의 밀도는 1.186kg/m^3 , 동적점성도는 $1.831\cdot 10^{-5}\text{kg/m}\cdot\text{s}$ 이며, ‘General material-He at STP’의 밀도는 0.179kg/m^3 , 동적 점성도는 $18.6\cdot 10^{-6}\text{kg/m}\cdot\text{s}$ 이다. 이 두 공기-헬륨 기체간의 Kinematic Diffusivity는 표 3.7에 나타내었으며 주요 물성치는 표 3.8에 나타내었다.

3.1.4. 경계 조건

해석에서 입출구를 제외한 모든 면은 No slip wall, adiabatic 조건으로 설정하였다. 입구에서는 일정한 농도의 혼합 기체가 유입되는 Normal speed를 설정하여 유속을 부여하였고, 출구는 Static Pressure의 조건으로 0Pa의 Relative Pressure를 설정하였다. [표 3.9]

Ansys의 CFX 14.0에서는 Laminar 흐름에 대해 Wall scale equation을 사용하지 않는 대신 경계 주변의 유속에 일정한 벽면 전단력이 작용하는 것을 가정, 벽면과의 거리를 고려하여 다음과 같은 식을 계산한다.

$$\left(U_{NW}^F\right)_{Tang} = \left(U_{IB}^{IMS}\right)_{Tang} + \frac{\mu_{FL}}{\mu_{NW}} \frac{\Delta y}{(\Delta y)_{NIBF} + \Delta y} \left[\left(U_{FL}\right)_{Tang} - \left(U_{IB}^{IMS}\right)_{Tang} \right]$$

(3.17)

여기서,

$\left(U_{NW}^F\right)_{Tang}$: NW 노드에서 Forcing velocity의 Tangential 성분

U_{FL} : FL노드에서 유체의 속도

μ_{FL} : FL노드에서 유체의 동점도

$(\Delta y)_{NIBF}$: FL'지점과 NW노드의 거리

또한 $\left(U_{IB}^{IMS}\right)_{Norm}$ 는 Forcing velocity의 Normal 성분은 IB

지점에서의 속도의 Normal과 동일하게 계산된다.

$$U_{NW}^F = (U_{IB}^{IMS})_{Norm} + (U_{NW}^F)_{Tang} \quad (3.18)$$

3.1.5. 초기 조건

해석 초기 조건은 파손 부위를 기준으로 외곽은 100% 공기, 안쪽 관은 혼합기체로 설정되어 있다. 계산 범위 전체의 온도는 300K이며 혼합기체의 비율은 계산 조건에 따라 각각 다르다. 계산이 시작되면 입구부를 통해 안쪽 혼합기체와 같은 비율의 혼합기체가 3.5초간 유입된다. Static pressure는 0Pa이다.

3.2. 해석 결과

3.2.1. 밀도 차 효과

계산결과 밀도 비(밀도 차)에 따른 경향성이 실험에서와 같음을 확인할 수 있었다. 실험에서와 동일하게 낮은 밀도 비(큰 밀도 차)에서 유입률은 증가하며 높은 밀도 비(작은 밀도 차)에서는 유입률이 감소한다[그림 3.4]. 그림 3.4에서의 error bar는 실험과의 오차를 나타낸다. 이 오차 값을 [표 3.10, 3.11]에 정량적으로 나타내었으며 이를 통해 전체적으로 CFD 계산 결과가 유입률을 낮게 예측하고 있음을 확인할 수 있다.

3.2.2. 파손 각도 효과

CFD계산 결과, 파손 각도에 의한 경향성이 실험결과와 매우 비슷한 양상을 보임을 확인할 수 있었다 [그림 3.5]. 0도부터 각도의 증가에 따라 유입률이 증가하며, 최대 유입률 이후에는 180도까지 유입률

감소를 보이며 실험과 같은 경향성을 보였다. 이에 실험에서 확인하지 못한 100~120도의 각도 구간을 CFD에서는 5도 간격으로 좀 더 잘게 쪼개 계산하여 최대 유입 각도를 확인하여 보았다 [그림 3.6]. 계산 결과, 110도와 115도가 동일한 최대의 유입률 값을 가지며 따라서 최대 유입률은 이 사이 각도에 존재함을 확인할 수 있었다.

그림 3.6에서 확인할 수 있듯이 밀도 비의 변화에도 최대 유입 지점은 변함이 없었으나, 밀도 비가 작을수록(밀도 차가 클수록) 유입률은 전체적으로 증가하였으며 각도에 의한 영향이 뚜렷하게 나타났다.

3.2.3. 파손 면적 효과

간헐적인 유입 현상이 지배적인 180도와 확산 현상이 지배적인 0~30도의 경우에는 유입/유출이 차지하는 면적을 정의하기가 어려우므로 CFD를 통한 면적 비 연구에서 제외하였다.

밀도 비, 내부 유속, 파손 각도 등의 여러 변수에 따라 전체 파손 단면적에서 유입과 유출이 차지하는 면적 비율이 서로 다르다 [그림 3.7, 3.8, 3.9]. 따라서 실제 유입 평균속도를 정확하게 이해하기 위해서는 이 면적 비율을 이해하는 것이 필요하다. 그러나 헬륨 및 공기를 사용한 본 실험에서는 실제 면적 비율을 확인할 수가 없으므로 CFD 계산을 통해 면적 비율을 확인하였다.

본 연구에서는 변수 조건에 따른 원형파손단면에서의 무거운 유체 유입 면적 비 α 를 CFD를 통해 미리 계산된 상수값으로 제안한다. 이 값은 유입 시작 후 3.5초, 관 중앙에서 0.0498m인 지점에서[그림 3.10] 계산된 값이다. 이를 유속에 따라 표 3.12, 3.13, 3.14, 3.15에 나타내었다. 공기 유입 면적 비율은 계산한 전체 유속 및 파손 밀도에서 0.5007 이상, 0.6224 이하를 나타냈으며 다른 변수들에 따라서 다소 불규칙하게 변화하는 양상을 보인다. 다만 모든 경우에서 유속, 각도가 같다면 밀도 비의 감소(밀도 차의 증가)에 따라 더 큰 유입 면적 비를 나타내는 경향성을 보였다.

공기 유입 속도를 $U_{in} = \dot{V} / A_{in}$ 을 이용하여 계산할 때, 면적 비율 α 를 정확히 알고 계산하는 것과 전체 파손 면적의 절반인 $A_{in} = A_{total} / 2$ 의 값을 이용하여 계산하는 것 사이에는 Froude number에서 최대 6%의 차이가 발생하였다[그림 3.11]. 이를 통해 유입 면적 비율을 이해하는 것이 정밀한 유입률 예측에 매우 중요함을 알 수 있다.

3.2.4. 내부 유속 효과

CFD 해석을 통해서 내부 유속이 공기유입률에 미치는 효과를 살펴보았다. 경향성의 전체 특징은 2.5.4.장에서 나타난 실험에서 나타난 결과와 동일하다. 다만 유속이 0이 아닌 경우에서 180도의 계산 결과는 전체적으로 실험값과 다소 차이가 있었다. 유속이 증가함에 따라 다른 각도에 비해서 180도의 값은 매우 크게 감소했다. 이는 180도에서 일어나는 간헐적인 유입 현상을 현재 격자 크기에서 부력과 확산 모델만을 이용해서는 정확히 계산하기 어렵기 때문인 것으로 보인다. 따라서 본 연구에서는 180도의 CFD 계산 결과를 해석에서 제외하였다.

관찰한 현상을 바탕으로, 밀도 차에 의한 유입이 지배적인 60~150도와 확산이 주요한 0, 30도의 두 그룹으로 나누어 그룹별로 CFD 계산 결과의 유입률 평균을 살펴보았다.

- CFD 계산의 경우, 밀도 차에 의한 유입이 지배적인 그룹은 유속 증가에 따라 전체 구간에서 유입률이 평균적으로 감소하였다 [그림 3.12].
- 또한 확산이 주요한 그룹은 전체 구간에서 유속 증가에 따라 유입률이 평균적으로 증가하였다 [그림 3.13].

실험 및 CFD 결과를 통해 내부 유속에 의한 공기유입률 영향이 밀도 비, 파손 지름과 밀접하게 연관되어 있는 것을 확인 할 수 있었다.

이는 4단원의 모델 개발에서 자세하게 다루었다.

3.3. 토의

CFD 해석을 통해 공기유입 주요 변수인 1) 밀도 비, 2) 파손 각도, 3) 내부 유속이 유입률에 미치는 영향을 살펴보았다. 이 결과를 실험과 비교하여 실험에서 나타난 경향성이 해석에서도 일치하여 나타나는지 확인할 수 있었다. 해석에는 Ansys사의 CFX 14.0이 사용되었으며 부력 모델과 수송 모델(확산)이 고려되었다.

그 결과 전체적으로 실험 결과와 경향성이 일치하였으며 유입률 또한 실험 결과와 잘 일치하였다. 해석에서 나타난 결과는 다음과 같다

- 실험과 동일하게 밀도 비의 감소(밀도 차의 증가)에 따라 유입률은 증가한다.
- 실험과 동일하게 파손 각도가 0도에서 110~115도까지 증가함에 따라 유입률은 증가하며, 그 이후 110~115도에서 180도까지는 유입률이 오히려 감소한다.
- 파손 각도가 110, 115도일 때 최대 유입률을 보이며 이는 다른 변수와 무관하다.
- 실험과 동일하게 밀도 비가 작을(밀도 차가 클)수록 각도의 효과가 크다.
- 내부 유속의 증가에 따라 60~150도는 유입률 감소, 0, 30도는 유입률 증가를 보인다.
- 내부 유속의 증가에 따른 유입률 변화는 다른 변수들의 영향에 비하여 상대적으로 매우 작지만, 유입률이 매우 크게 변화하는 특정 유속 지점이 나타나며 이 이후는 관성력이 유입 현상에 지배적인 것으로 보인다.
- 관성력이 유입 현상에 지배적인 영역에서는 유속의 증가에 따라

유입률이 증가한다. 이는 베르누이의 원리에 의한 것으로 예상된다.

- 실험에서 약 0.7 이상의 높은 밀도 비(낮은 밀도 차) 구간에서의 유입률이 각도에 의한 차이가 두드러지지 않았던 것과는 다르게, 해석에서는 선명하게 구분되었다. 이는 관성력에 의해 형성되는 파손 부위 주변에서의 불안정성이 CFD 해석에서는 잘 묘사되지 않았기 때문인 것으로 추측된다. 따라서 추후 실험에서는 이와 같은 파손 부위 주변에서의 유체 거동을 엄밀히 조사할 필요가 있을 것이다.
- 파손을 통해 유입/배출되는 기체는 서로 반대 방향이며, 이들이 파손 단면적을 차지하는 비율은 같지 않다. 또한 이 비율은 밀도 비, 내부 유속, 파손 각도 등 다른 변수들에 영향을 받으므로 본 연구에서는 미리 계산된 유입 면적 비 α 를 제안한다.

위와 같은 결과로 해석이 실험 결과와 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 유사한 유입률을 보여 그러나 다음의 한계점이 존재하였다.

- 파손 각도 180도의 경우는 유속의 증가에 따라 매우 크게 감소하며 실험의 거동과 다소 다른 결과를 보였다. 이는 Taylor instability등 해석이 좀 더 복잡한 현상에서 기인하는 것으로 예상된다.
- CFD 계산 값은 전체적으로 실험 값보다 작다. 따라서 전체에서 유입에 영향을 미치는 요소를 고려하지 못하였을 수도 있다.

표 3.1 공기유입 장치 모델 메쉬 통계

		공기유입 장치 모델
Number of Element	Tetrahedra	654,403
Number of Node		126,825

표 3.2 해석 케이스 및 계산 주요 변수 (내부유속 0m/s)

케이스 번호	파손 지름 [mm]	내부 유속 [m/s]	파손 각도 [deg]	밀도 비
1	15	0	180	0.2625
2				0.4447
3				0.5717
4				0.7743
5			150	0.2625
6				0.4447
7				0.5717
8				0.7743
9			120	0.2625
10				0.4447
11				0.5717
12				0.7743
13			90	0.2625
14				0.4447
15				0.5717
16				0.7743
17			60	0.2625
18				0.4447
19				0.5717
20				0.7743
21			30	0.2625
22				0.4447
23				0.5717
24				0.7743
25			0	0.2625
26				0.4447
27				0.5717
28				0.7743

표 3.3 해석 케이스 및 계산 주요 변수 (내부유속 0.1m/s)

케이스 번호	파손 지름 [mm]	내부 유속 [m/s]	파손 각도 [deg]	밀도 비
29	15	0.1	180	0.2625
30				0.4447
31				0.5717
32				0.7743
33			150	0.2625
34				0.4447
35				0.5717
36				0.7743
37			145	0.2625
38			140	0.2625
39				0.4447
40			135	0.2625
41			130	0.2625
42				0.4447
43			125	0.2625
44			120	0.2625
45				0.4447
46				0.5717
47				0.7743
48			115	0.2625
49				0.4447
50			110	0.2625
51				0.4447
52			105	0.2625
53				0.4447
54			100	0.2625
55				0.4447
56			95	0.2625
57			90	0.2625
58				0.4447
59				0.5717
60				0.7743
61			60	0.2625
62				0.4447
63				0.5717
64				0.7743
65			30	0.2625
66				0.4447
67				0.5717
68				0.7743
69			0	0.2625
70				0.4447
71				0.5717
72				0.7743

표 3.4 해석 케이스 및 계산 주요 변수 (내부유속 0.275m/s)

케이스 번호	파손 지름 [mm]	내부 유속 [m/s]	파손 각도 [deg]	밀도 비
73	15	0.275	180	0.2625
74				0.4447
75				0.5717
76				0.7743
77			150	0.2625
78				0.4447
79				0.5717
80				0.7743
81			120	0.2625
82				0.4447
83				0.5717
84				0.7743
85			90	0.2625
86				0.4447
87				0.5717
88				0.7743
89			60	0.2625
90				0.4447
91				0.5717
92				0.7743
93			30	0.2625
94				0.4447
95				0.5717
96				0.7743
97			0	0.2625
98				0.4447
99				0.5717
100				0.7743

표 3.5 해석 케이스 및 계산 주요 변수 (내부유속 0.370m/s)

케이스 번호	파손 지름 [mm]	내부 유속 [m/s]	파손 각도 [deg]	밀도 비
101	15	0.370	180	0.2625
102				0.4447
103				0.5717
104				0.7743
105			150	0.2625
106				0.4447
107				0.5717
108				0.7743
109			130	0.2625
110			120	0.2625
111				0.4447
112				0.5717
113				0.7743
114			115	0.2625
115			110	0.2625
116			105	0.2625
117			100	0.2625
118			90	0.2625
119				0.4447
120				0.5717
121				0.7743
122			60	0.2625
123				0.4447
124				0.5717
125				0.7743
126			30	0.2625
127				0.4447
128				0.5717
129				0.7743
130			0	0.2625
131				0.4447
132				0.5717
133				0.7743

표 3.6 해석 케이스 및 계산 주요 변수 (내부유속 0.435m/s)

케이스 번호	파손 지름 [mm]	내부 유속 [m/s]	파손 각도 [deg]	밀도 비
134	15	0.435	180	0.2625
135				0.4447
136				0.5717
137				0.7743
138			150	0.2625
139				0.4447
140				0.5717
141				0.7743
142			120	0.2625
143				0.4447
144				0.5717
145				0.7743
146			90	0.2625
147				0.4447
148				0.5717
149				0.7743
150			60	0.2625
151				0.4447
152				0.5717
153				0.7743
154			30	0.2625
155				0.4447
156				0.5717
157				0.7743
158			0	0.2625
159				0.4447
160				0.5717
161				0.7743

표 3.7 Kinematic Diffusivity 입력값

Temperature [K]	Kinematic Diffusivity [cm ² /s]
300	0.2600
400	0.4540
500	0.6733
600	0.9284
700	1.2180
800	1.5418
900	1.8908
1000	2.2715
1100	2.6821
1300	3.9876

표 3.8 기체 물성치

	밀도 [kg/m ³]	동적점성도 [kg/m·s]	열용량 [J/kg·K]	열전도도 [W/m·K]
공기	1.185	0.179	1.0044e3	2.61e-2
헬륨	1.831e-5	18.6e-06	5240	1415e-4

표 3.9 해석 모델 경계 조건

조건	값
혼합기체 입구 밀도비	0.2625, 0.4447, 0.5717, 0.7743
혼합기체 입구 유속 [m/s]	0, 0.1, 0.275, 0.370, 0.435
출구 조건	0Pa Relative Pressure

표 3.10 파손 지름 15mm, 내부 유속 0.275m/s에서의 실험-계산
차이값

밀도 비[%] 각도	0.2625	0.4448	0.5719	0.7743
180도	2.02E-07	1.31E-06	1.74E-06	1.76E-06
150도	1.25E-07	1.44E-07	3.16E-07	7.12E-07
120도	9.67E-08	2.24E-08	4.77E-07	5.86E-07
90도	4.01E-07	3.72E-07	5.25E-07	5.09E-07
60도	1.59E-06	3.87E-07	1.15E-07	6.33E-07
30도	4.23E-08	4.25E-07	7.6E-07	7.25E-07
0도	8.77E-07	8.36E-07	6.21E-07	9.36E-07

표 3.11 파손 지름 15mm, 내부 유속 0.275m/s에서의 실험-계산
오차(실험값 기준)

밀도 비[%] 각도	0.2625	0.4448	0.5719	0.7743
180도	-3.70%	-38.40%	-64.44%	-87.14%
150도	-1.12%	2.45%	-8.32%	-43.61%
120도	-0.76%	-0.32%	-10.46%	-33.55%
90도	-3.25%	-5.38%	-12.04%	-31.26%
60도	22.52%	8.84%	-3.89%	-42.96%
30도	-1.35%	-18.43%	-38.40%	-62.22%
0도	-48.80%	-57.41%	-57.45%	-80.97%

표 3.12 유입 면적 비 α CFD 계산 값 (내부 유속 0m/s)

	밀도 비	0.2625	0.4448	0.5719	0.7743
150도	공기 면적비 (α)	0.5718	0.5472	0.5258	0.5007
	헬륨 면적비 ($1-\alpha$)	0.4284	0.4528	0.4742	0.4993
120도	공기 면적비 (α)	0.5815	0.5536	0.5458	0.5161
	헬륨 면적비 ($1-\alpha$)	0.4186	0.4465	0.4542	0.4839
90도	공기 면적비 (α)	0.5877	0.5625	0.5492	0.5260
	헬륨 면적비 ($1-\alpha$)	0.4121	0.4375	0.4508	0.4739
60도	공기 면적비 (α)	0.5906	0.5670	0.5517	0.5296
	헬륨 면적비 ($1-\alpha$)	0.4092	0.4330	0.4483	0.4704

표 3.13 유입 면적 비 α CFD 계산 값 (내부 유속 0.1m/s)

	밀도 비	0.2625	0.4448	0.5719	0.7743
150도	공기 면적비 (α)	0.6110	0.5764	0.5484	0.5275
	헬륨 면적비 ($1-\alpha$)	0.3888	0.4234	0.4516	0.4725
120도	공기 면적비 (α)	0.5928	0.5769	0.5512	0.5433
	헬륨 면적비 ($1-\alpha$)	0.4069	0.4231	0.4487	0.4567
90도	공기 면적비 (α)	0.6105	0.5707	0.5609	0.5499
	헬륨 면적비 ($1-\alpha$)	0.3896	0.4291	0.4391	0.4501
60도	공기 면적비 (α)	0.6122	0.5815	0.5557	0.5488
	헬륨 면적비 ($1-\alpha$)	0.3878	0.4187	0.4443	0.4512

표 3.14 유입 면적 비 α CFD 계산 값 (내부 유속 0.275m/s)

	밀도 비	0.2625	0.4448	0.5719	0.7743
150도	공기 면적비 (α)	0.6105	0.5701	0.5495	0.5471
	헬륨 면적비 ($1-\alpha$)	0.3894	0.4299	0.4505	0.4529
120도	공기 면적비 (α)	0.6139	0.5803	0.5690	0.5520
	헬륨 면적비 ($1-\alpha$)	0.3862	0.4196	0.4309	0.4481
90도	공기 면적비 (α)	0.6008	0.5911	0.5712	0.5545
	헬륨 면적비 ($1-\alpha$)	0.3992	0.4088	0.4286	0.4455
60도	공기 면적비 (α)	0.6156	0.5854	0.5781	0.5690
	헬륨 면적비 ($1-\alpha$)	0.3847	0.4142	0.4218	0.4309

표 3.15 유입 면적 비 α CFD 계산 값 (내부 유속 0.370m/s)

	밀도 비	0.2625	0.4448	0.5719	0.7743
150도	공기 면적비 (α)	0.6088	0.5764	0.5493	0.5900
	헬륨 면적비 ($1-\alpha$)	0.3913	0.4236	0.4507	0.4100
120도	공기 면적비 (α)	0.6224	0.5860	0.5621	0.5612
	헬륨 면적비 ($1-\alpha$)	0.3778	0.4137	0.4379	0.4388
90도	공기 면적비 (α)	0.6116	0.5803	0.5729	0.5707
	헬륨 면적비 ($1-\alpha$)	0.3886	0.4197	0.4269	0.4296
60도	공기 면적비 (α)	0.6150	0.5917	0.5798	0.5957
	헬륨 면적비 ($1-\alpha$)	0.3851	0.4086	0.4202	0.4046

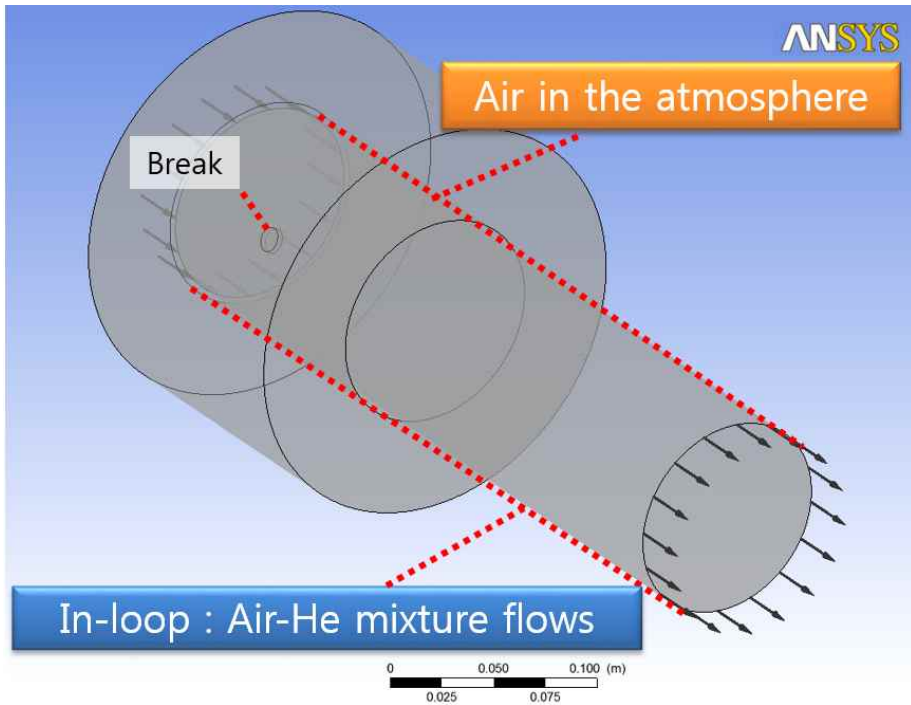


그림 3.1 CFD 계산 모델

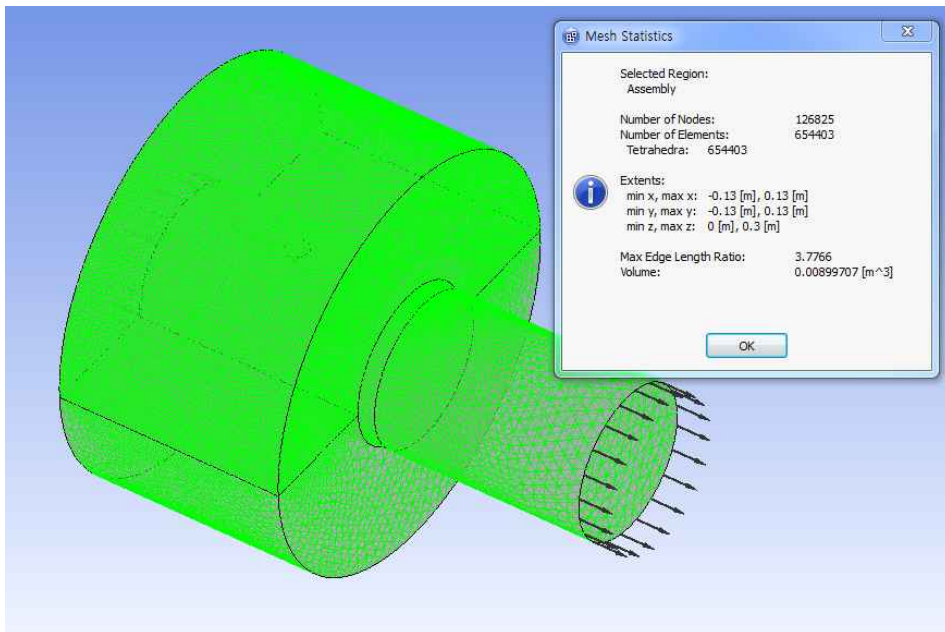


그림 3.2 CFD 격자 모델

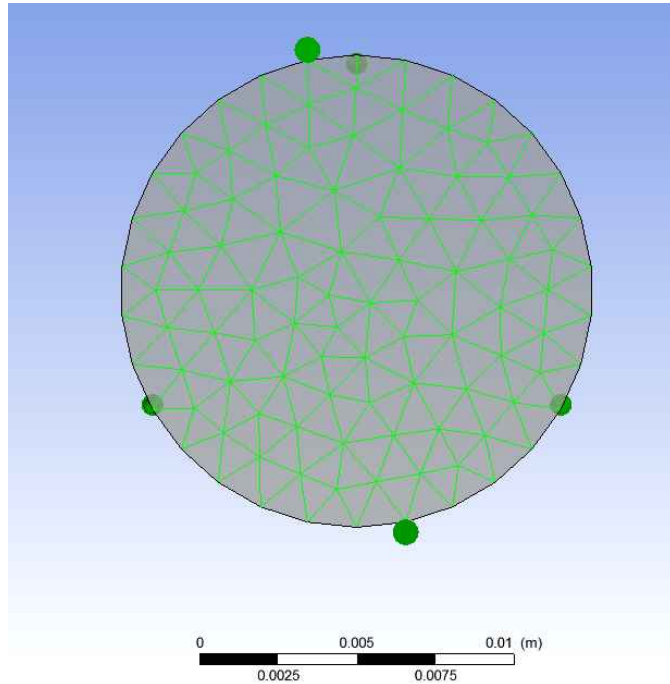


그림 3.3 파손 부위 격자 모델

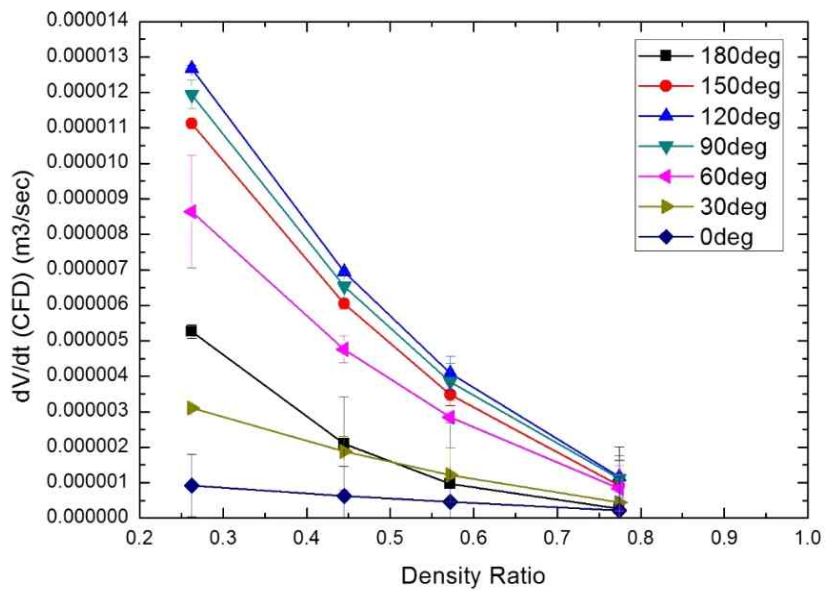


그림 3.4 dV_{air}/dt vs 밀도 비 ($D=15\text{mm}$, $U=0.275\text{m/s}$, CFD,

실험과 비교)

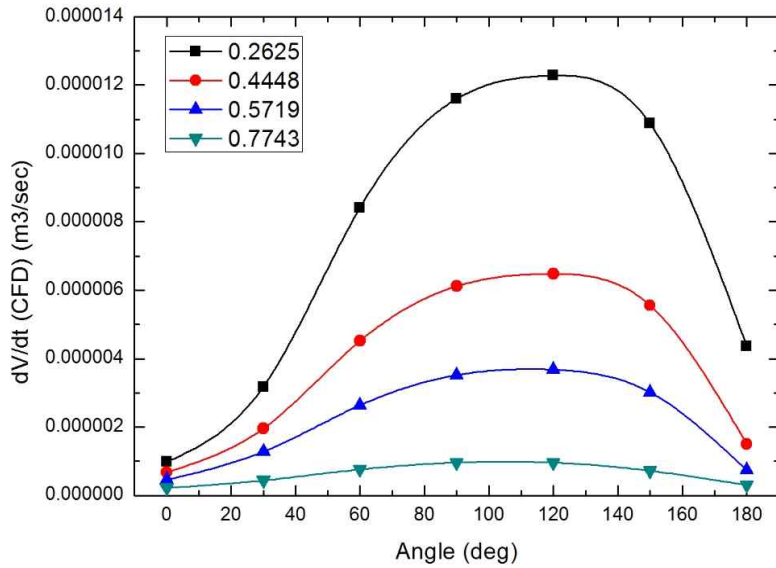


그림 3.5 dV_{air}/dt vs 각도 ($D=15$, $U=0.370\text{m/s}$, CFD)

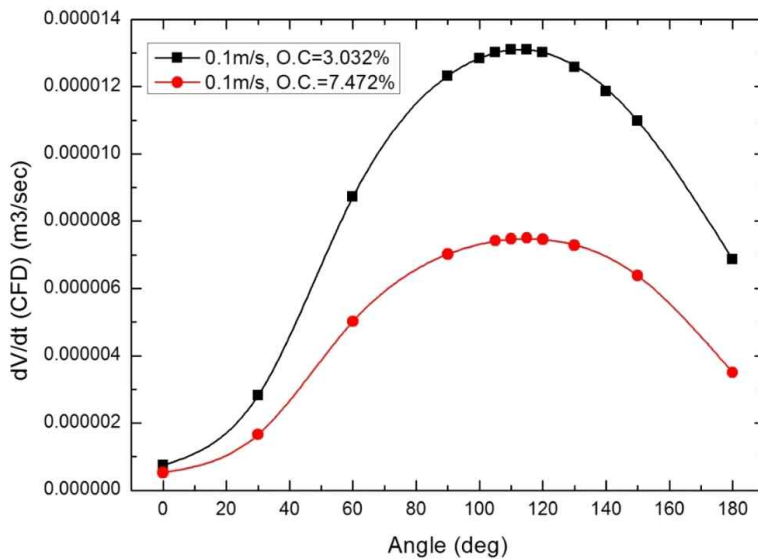


그림 3.6 dV_{air}/dt vs 각도 (최대 유입 각도 계산, CFD)

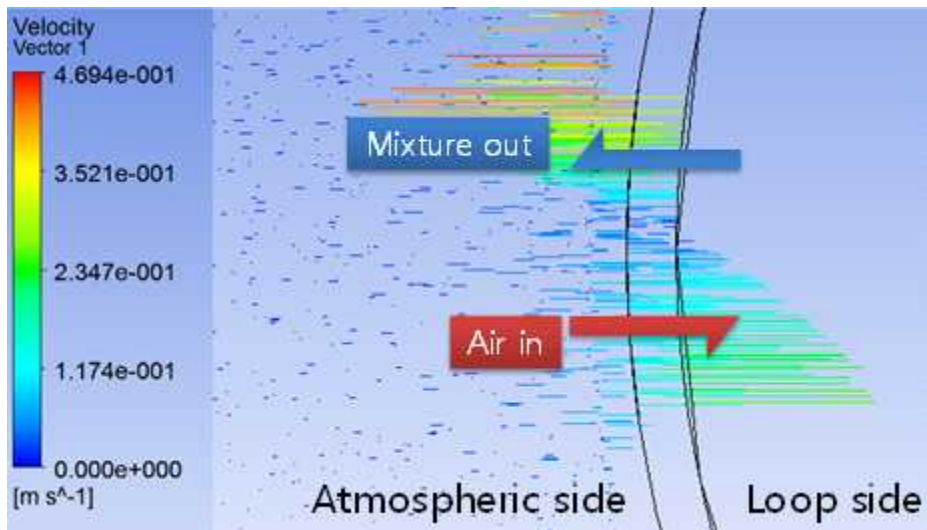


그림 3.7 속도로 구분한 유출 및 유입 면적 (CFD)

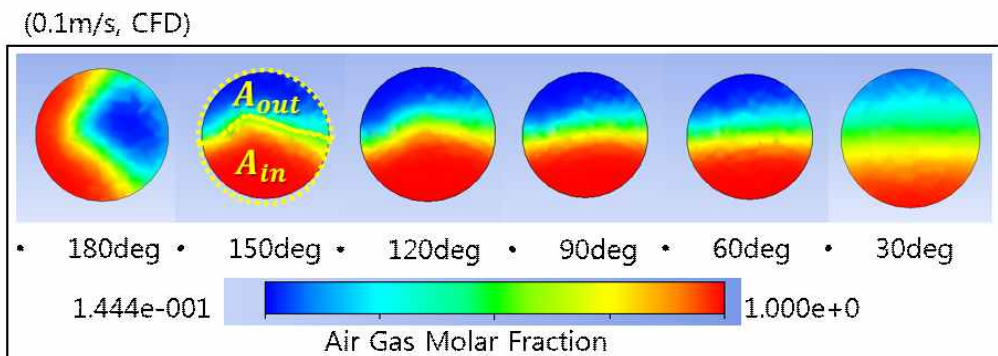


그림 3.8 각도별 유입 및 유출 단면적

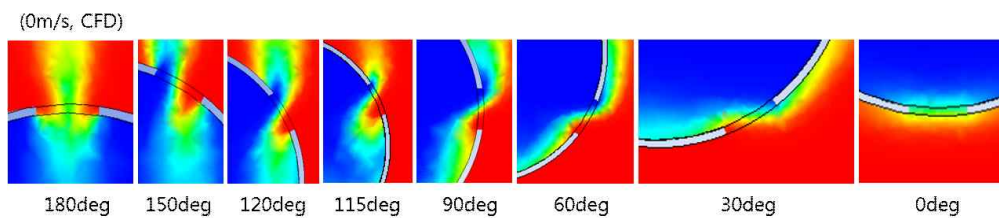


그림 3.9 각도별 유입 및 유출 단면적

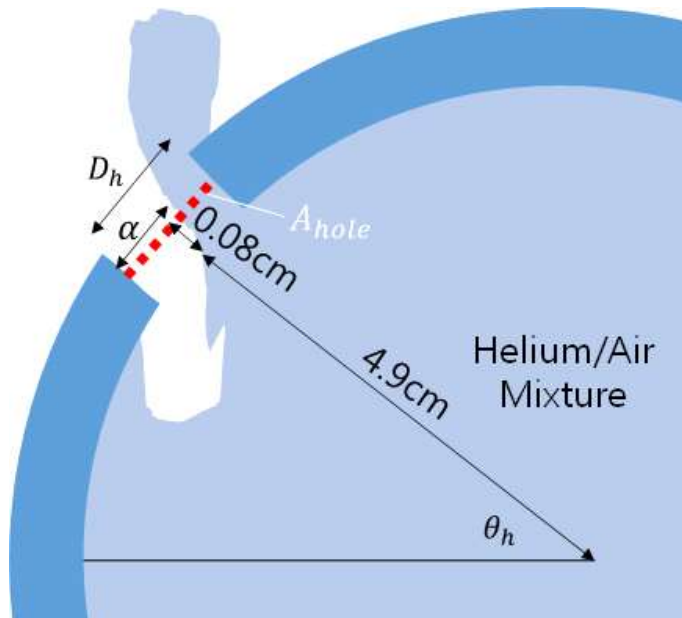


그림 3.10 CFD 단면적 비율 계산 위치

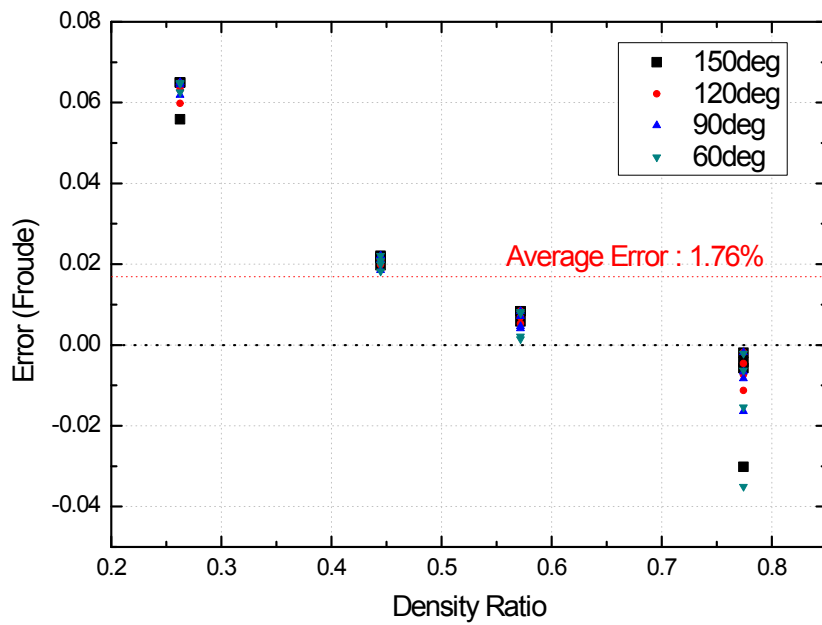


그림 3.11 면적 비 반영/반영하지 않은 Froude 수 차이 ($D=15\text{mm}$, $U=0\text{m/s}$, CFD)

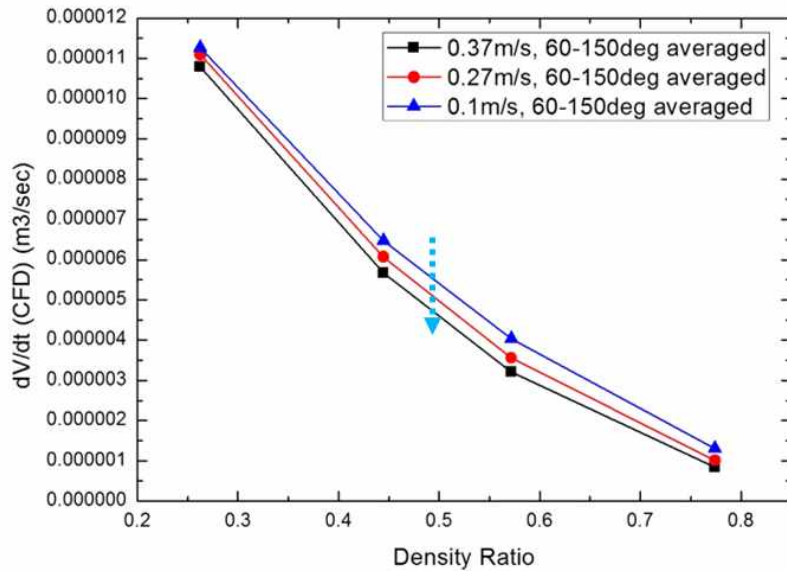


그림 3 12 유속 변화에 따른 60~150도 평균 dV_{air}/dt vs 밀도 비
(D=15mm, CFD)

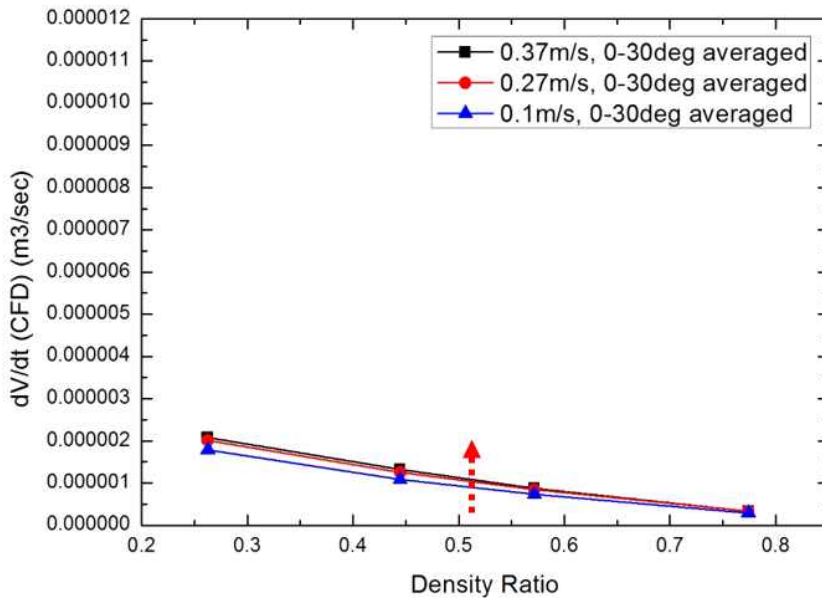


그림 3 13 유속 변화에 따른 0, 30도 평균 dV_{air}/dt vs 밀도 비
(D=15mm, CFD)

4. 공기유입현상 분석

4.1. Froude 수 정의

4.1.1. Froude 수와 $Fr_{projected}$ 유도

Froude 수는 관성력과 중력의 비율을 나타내는 무차원 수로 공기유입 정도를 무차원화 하여 나타내는데 유용하다. Froude 수는 다음과 같이 정의된다.

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gD}} \quad (4.1)$$

밀도 차에 의한 유입에서 이 식은 베르누이의 정리로 간단히 유도될 수 있으며, 유체의 위치 에너지가 운동에너지로 전환되는 비율과도 연관이 있다.

파손 지름을 통해 실험장치 외부의 공기가 유입되고 실험장치 내부의 공기-헬륨 기체가 유출된다. 유체의 교환은 외부에서 추가적으로 가한 힘 없이 밀도 차로 인한 부력에 의해 이동하였으며 이 과정에서 에너지 손실이 없다고 가정한다 [그림 4.1]. 이 때 단위 유체의 운동에너지를 고려하면, 이동 전후의 내부에너지는

$$\rho_H g H_{H1} + \rho_L g H_{L1} = \rho_H g H_{H2} + \rho_L g H_{L2} + \frac{\rho_H U_H^2}{2} + \frac{\rho_L U_L^2}{2} \quad (4.2)$$

여기서,

ρ_H : 무거운 유체의 밀도 [kg/m³]

ρ_L : 가벼운 유체의 밀도 [kg/m³]

H_{H1} : 무거운 유체의 초기 높이 [m]

H_{L1} : 가벼운 유체의 초기 높이 [m]

H_{H2} : 무거운 유체의 이동 후 높이 [m]

H_{L2} : 가벼운 유체의 이동 후 높이 [m]

U_H : 무거운 유체의 이동 후 속도 [m/s]

U_L : 가벼운 유체의 이동 후 속도 [m/s]

g : 중력 가속도 (9.8m/s^2)

이를 다시 정리하면,

$$\rho_H g \cdot dH - \rho_L g \cdot dH = \frac{\rho_H U_H^2}{2} + \frac{\rho_L U_L^2}{2} \quad (4.3)$$

$$(dH = H_1 - H_2 = H_{H1} - H_{H2} = H_{L2} - H_{L1}, dH \text{ 는 양수})$$

으로 나타낼 수 있다. 식 4.3 전체를 좌변으로 나누고 제곱근을 취하면

$$1 = \sqrt{\frac{\rho_H U_H^2 + \rho_L U_L^2}{2(\rho_H - \rho_L)g \cdot dH}} \quad (4.4)$$

로 정리할 수 있으며 우변은 Froude 수의 정의와 같은 형태이다. 실제 현상에서는 에너지의 손실 및 변환이 발생하므로 이 값은 1보다 낮다. 이를 다시 정리하면

$$Fr = \sqrt{\frac{\rho_H U_H^2 + \rho_L U_L^2}{2(\rho_H - \rho_L)g \cdot dH}} \quad (4.5)$$

이고, 만약 $U = U_H = U_L$ 로, 유입되는 속도 U_H 와 유출되는 속도 U_L 이 같을 경우

$$Fr = \sqrt{\frac{U^2}{\frac{(\rho_H - \rho_L)}{\bar{\rho}} g \cdot dH}} \quad (4.6)$$

$$(\bar{\rho} = \frac{\rho_H + \rho_L}{2}, \text{실험장치 내/외 평균 밀도})$$

이며 이것은 기존 Froude 수의 한 형태이다.

본 실험의 경우 $A_{in} \neq A_{out}$ 로, ($A_{hole} = A_{total} = A_{in} + A_{out}$) 유입과 유출의 면적이 서로 같지 않아 유입되는 속도 U_H 와 유출되는 속도 U_L 이 $U_H \neq U_L$ 로 서로 같지 않다. 또한 유체가 파손을 사이에 두고 교환된 직후의 높이 변화는

$$dH = \frac{D}{2} \sin \theta \quad (4.7)$$

여기서,

D : 파손 지름

θ : 파손 각도

라고 할 수 있다 [그림 4.2]. 이를 식 4.5에 대입하고 정리하면

$$\begin{aligned} Fr_{projected} &= \sqrt{\frac{\rho_H U_H^2 + \rho_L U_L^2}{(\rho_H - \rho_L)gD \cdot \sin \theta}} \\ &= \sqrt{\frac{1}{\alpha^2} + \frac{\gamma}{(1-\alpha)^2}} \cdot \frac{\frac{\dot{V}}{A}}{\sqrt{(1-\gamma)gD \sin \theta}} \\ &(\quad U_H = \frac{\dot{V}}{A_{in}}, \quad U_L = \frac{\dot{V}}{A_{out}}, \quad \alpha = \frac{A_{in}}{A_{total}}, \quad \gamma = \frac{\rho_L}{\rho_H} \quad) \end{aligned} \quad (4.8)$$

4.1.2. 각 Froude 수의 특징

앞서 기존 Froude 수의 정의와 더불어 $Fr_{projected}$ 를 제안하였다. 이는 각도에 따른 실험 결과를 정렬하는데 도움을 준다. 본 연구에서 취득한

공기유입 자료를 두 가지 자료를 기존 Froude 수인 식 4.5와 $Fr_{projected}$ 인 식 4.8로 정리하였을 경우 각각 그림 4.3과 그림 4.4로 나타나며 $Fr_{projected}$ 는 각도가 큰 순서부터 정렬되는 것을 확인할 수 있다 [그림 4.4]. 이와 같은 특징을 4장의 모델 개발에서 유용하게 이용할 수 있다.

4.2. 지배 영역 구분 (부력 우세, 확산 우세)

앞 장에서 실험 및 CFD 계산 결과를 통해 공기 유입 현상이 밀도 차에 의한 부력과 내부 관성력에 지배되는 현상이라는 것을 확인하였다. 공기유입은 파손 각도에 의해서 매커니즘 별로 유입률이 다르므로 각도에 의해 구분되는 정도를 부력과 관성력의 우세성을 판단하는 기준으로 삼을 수 있다. 이 같은 특징은 [그림 4.5, 4.6]에서 잘 확인할 수 있다. 파손 지름 3mm의 실험 [그림 4.5]에서는 각도에 의한 유입 특징이 전혀 드러나지 않았다. 그러나 다른 변수를 그대로 한 채, 파손 지름이 18mm로 증가하였을 경우 [그림 4.6], 낮은 밀도 비(큰 밀도 차)에서는 각도에 의한 특징이 매우 잘 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 뿐만 아니라 3장에서 내부 유속에 의한 효과를 확인하며 이 같은 특징을 또한 잘 살펴볼 수 있었다. 내부 유속이 증가함에 따라서 부력에 의한 유입률은 점점 감소하였으며 특정 유속을 지나면서 유입률이 크게 감소, 이후의 유입은 관성력에 의존하여 이루어지는 것으로 보인다.

이러한 관찰을 바탕으로 모든 실험 결과들에서 각도에 의한 효과가 뚜렷이 나타나는 지점과 그렇지 않은 지점을 나누어 주었다 [그림 4.7]. 전체 실험 결과에서 관찰된 특징은 다음과 같다.

부력 우세 조건:

$$\frac{U_{inside} \downarrow}{\Delta \rho \uparrow \cdot D_{hole} \uparrow} \quad (4.9)$$

여기서,

U_{inside} : 내부 유속 [m/s]

$\Delta\rho$: 실험 장치 내/외 밀도 차[kg/m³]

D_{hole} : 파손 지름 [m]

- 내부 밀도가 작을수록(외부와의 밀도 차가 클수록, 밀도 비가 작을수록) 부력에 의한 유입 특징을 보였다.
- 유속이 느릴수록 부력에 의한 유입 특징을 보였다.
- 파손 크기가 클수록 더 빠른 유속에서도 부력에 지배받는 특징을 보였다.

이 같은 특징을 모두 표현할 수 있는 무차원 수는 Froude 수로, 관성력과 중력에 의한 유체흐름의 비율을 나타낸다. 따라서 전체 실험 값을 1) 각도에 의해 크게 구분 되는 자료, 2) 모호한 자료, 3) 각도에 의한 효과가 나타났다고 보기 어려운 자료 세 가지로 나누어 위 기준을 통해 계산한 Froude 수가 지배 매커니즘 별로 나뉘는지 확인하였다.

그 결과 대략적으로 2.00의 값을 기준으로 부력 우세/관성력 우세 구간이 나뉘는 것을 확인할 수 있었다[그림 4.8]. 이에 본 연구에서는 공기유입사고에서의 부력/관성력 지배 매커니즘을 구분할 수 있는 Froude criteria를 다음과 같이 제안한다.

$$Fr_{criteria} = \frac{U_{inside}}{\sqrt{\left(\frac{\rho_H - \rho_L}{\rho_H + \rho_L}\right)g \cdot D_{hole}}} \quad (4.10)$$

$Fr_{criteria} < 2.00$: 부력 지배 구간

$Fr_{criteria} > 2.00$: 관성력 지배 구간

4.3. 토의

앞서 $Fr_{projected}$ 의 정의를 살펴보았다. 또한 [그림 4.4]에서 각도에 따라 $Fr_{projected}$ 가 정렬되는 것을 확인할 수 있었다. 뿐만 아니라 본 연구에서는 $Fr_{projected}$ 의 제곱인 Fr_{proj}^2 가 각도에 비례하여 증가하는 것을 확인할 수 있었다 [그림 4.9, 4.10]. 따라서

$$Fr_{proj}^2 \propto \theta \quad (4.11)$$

이고, 이 때의 기울기는 밀도 비의 증가에 따라 조금씩 감소하였다. 또한 유속의 증가에 따라 기울기가 점점 감소하였다. 따라서,

$$\frac{Fr_{proj}^2}{\theta} = f(U_{inside}, \gamma) \quad (4.12)$$

(θ 는 차원이 없는 호도, radian)

이러한 경향성은 CFD 계산 값뿐만 아니라 실험 결과에서도 확인할 수 있었다 [그림 4.17-수정할것].

그런데 $Fr_{projected}$ 는 \dot{V} 을 이용해 계산된 값이므로 정의에 따라

$$\frac{Fr_{proj}^2}{\theta} = \left(\frac{1}{\alpha^2} + \frac{\gamma}{(1-\alpha)^2} \right) \cdot \frac{\dot{V}^2}{A^2(1-\gamma)gD\theta\sin\theta} = f(U_{inside}) \quad (4.13)$$

이다. 여기서 유입 면적 비율인 α 는 CFD 계산 결과에서만 확인할 수 있으므로 식 4.13에 계산 값을 대입하여 그림 4.11에 나타내었다.

그림 4.11에서는 Fr_{proj}^2/θ 가 밀도 비에 따라 선형적으로 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한 y축 절편이 유속에 관계없이 0.2의 값을 가짐을 확인할 수 있다. 이러한 상수가 나온 이유에 대해서는 아직 이론적인 근거를 찾지 못하였다. 이와 같은 특징들은 추후 연구에서 공기유입률 모델 개발에 적용할 수 있을 것이다.

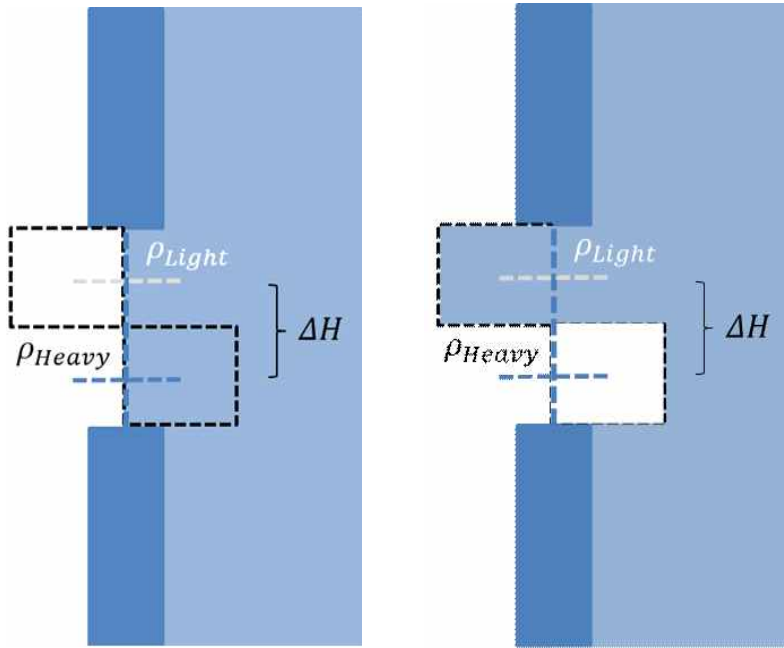


그림 4.1 밀도 차에 의한 유체 교환 높이

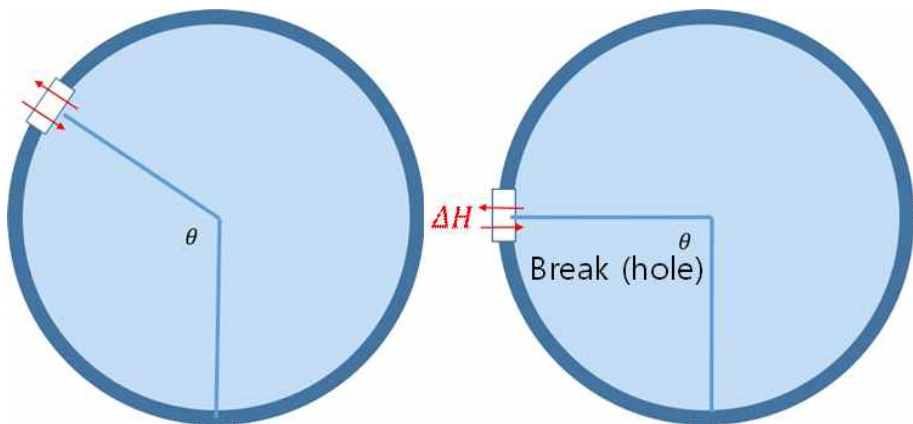


그림 4.2 실험시 유체 교환 높이

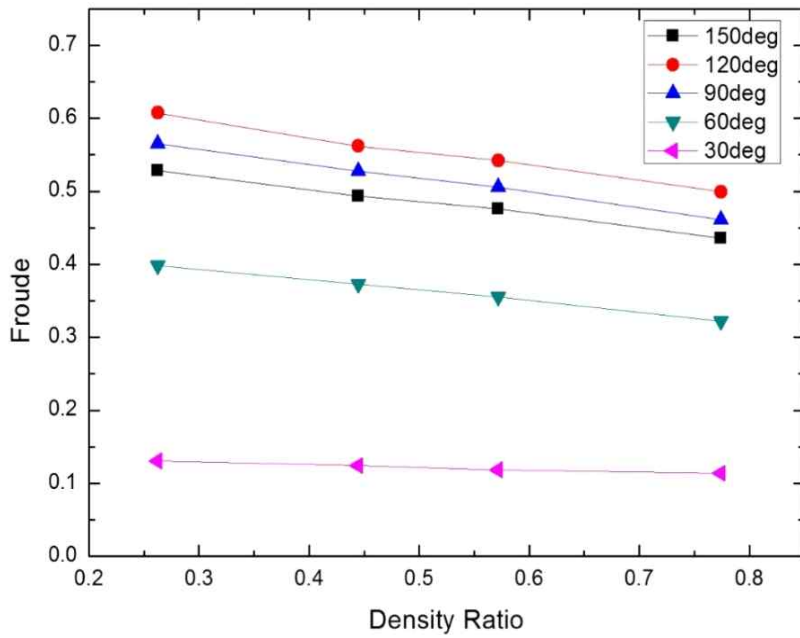


그림 4.3 Froude 수 vs 밀도 비 ($D=15\text{mm}$, $U=0\text{m/s}$, CFD)

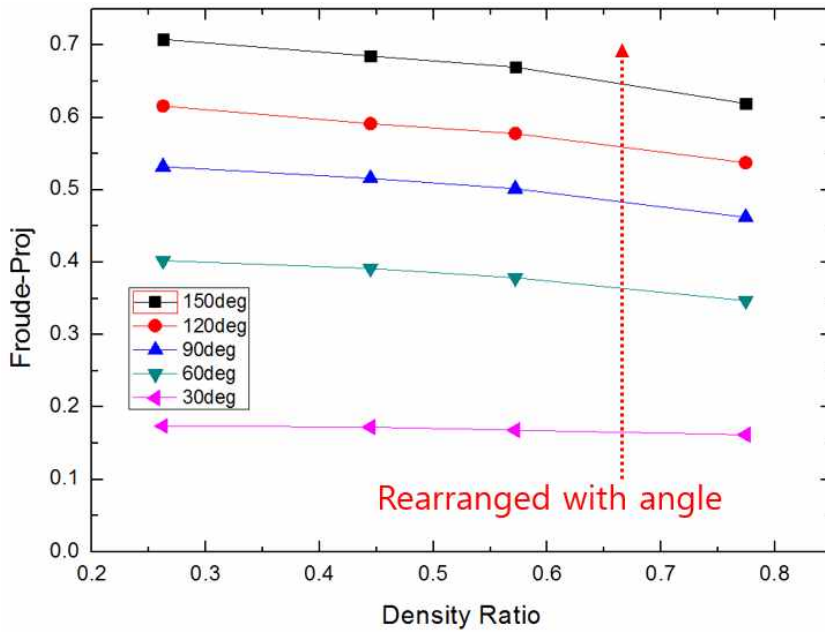


그림 4.4 $Fr_{projected}$ vs 밀도 비 ($D=15\text{mm}$, $U=0\text{m/s}$, CFD)

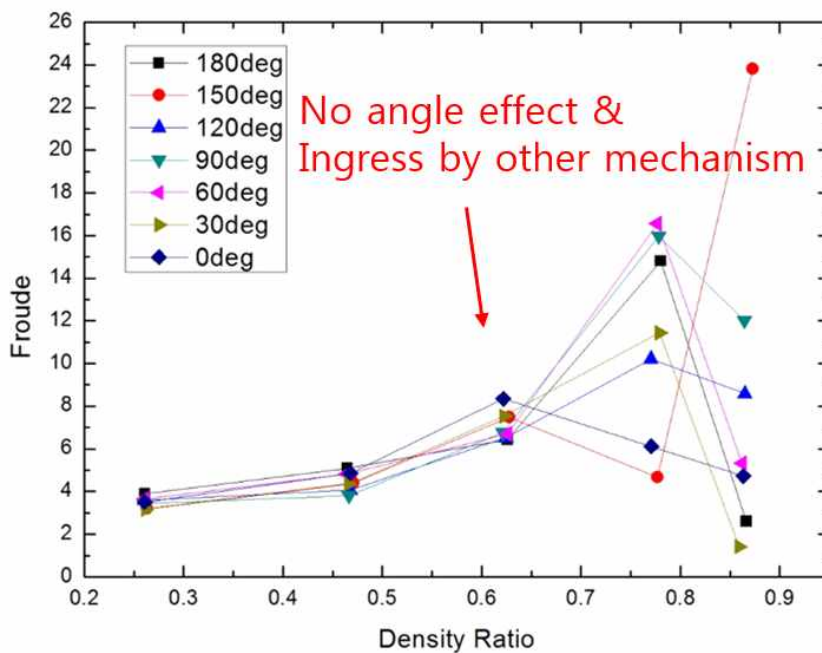


그림 4.5 Froude vs 밀도 비 ($D=3\text{mm}$, $U=0.275\text{m/s}$, 실험)

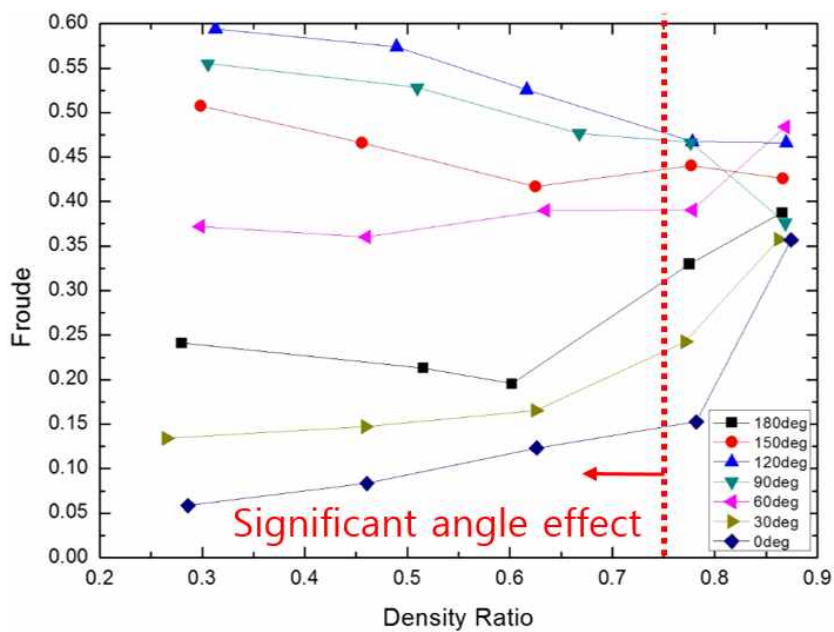


그림 4.6 Froude vs 밀도 비 ($D=18\text{mm}$, $U=0.275\text{m/s}$, 실험)

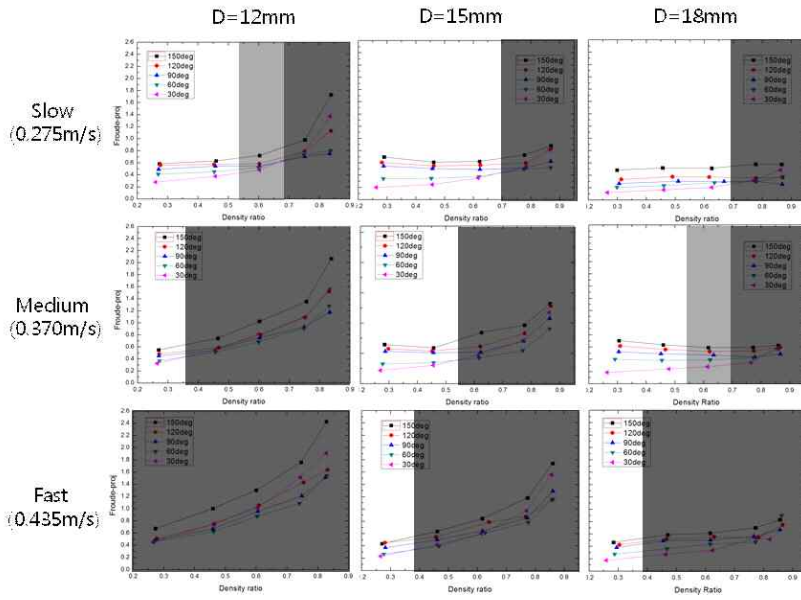


그림 4.7 부력 우세 구간(밝은 부분) 및 관성력 우세 구간 (어두운 부분) 구분

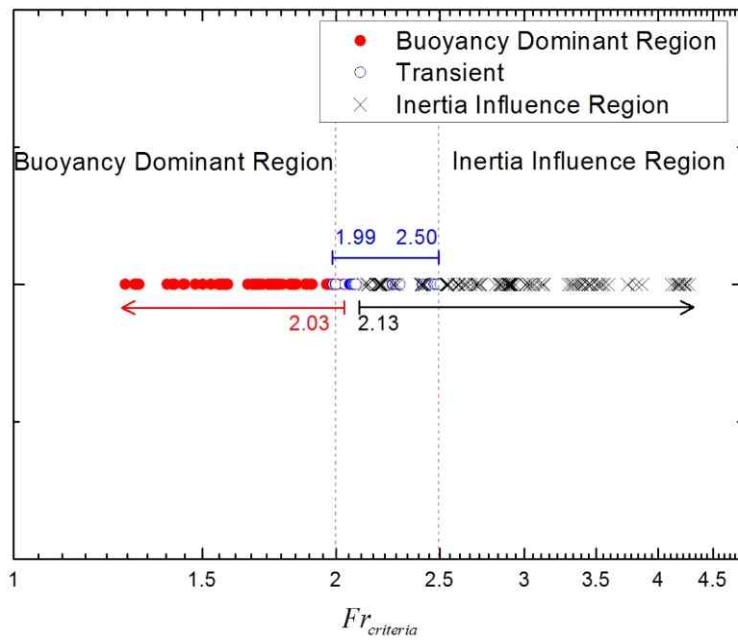


그림 4.8 지배메커니즘 별 Froude criteria

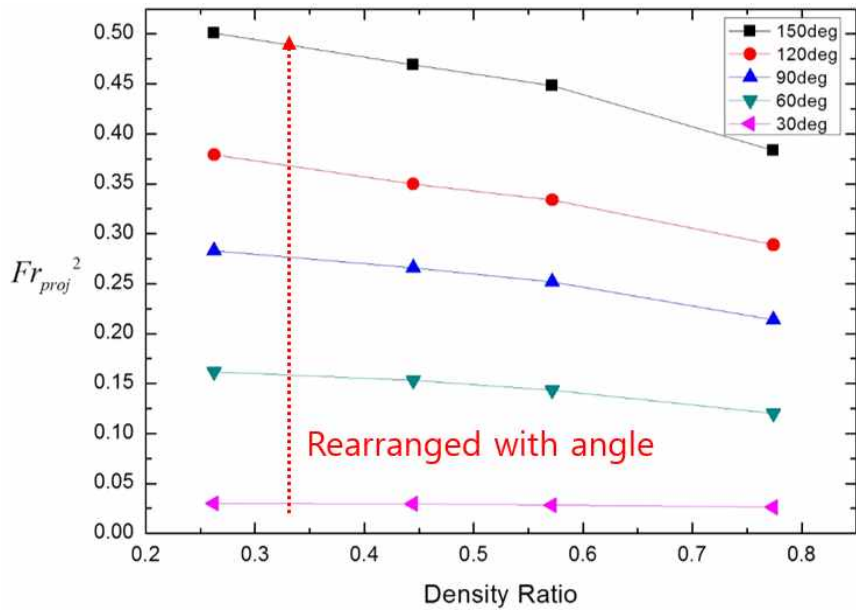


그림 4.9 Fr_{proj}^2 vs 밀도 비 (D=15mm, U=0m/s, CFD)

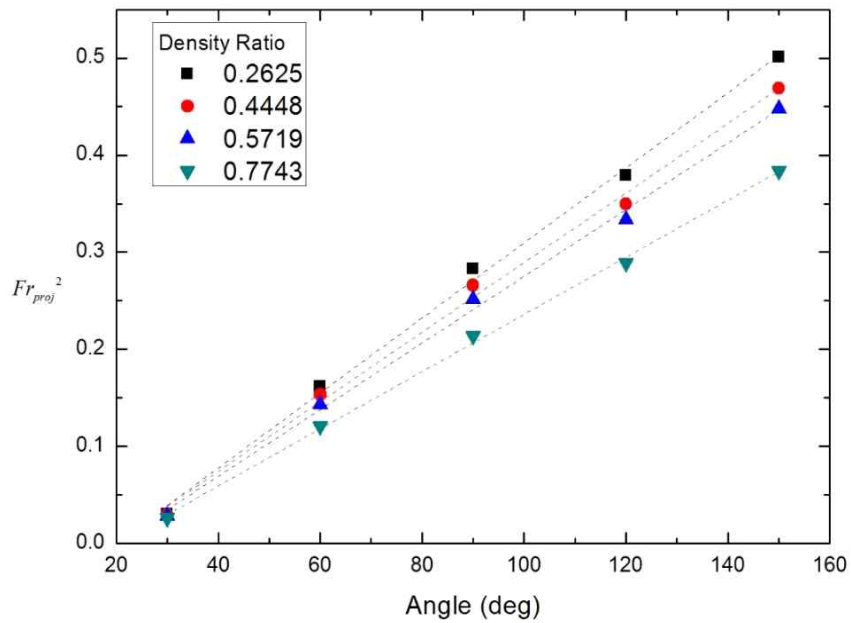


그림 4.10 Fr_{proj}^2 vs 각도 (D=15mm, U=0m/s, CFD)

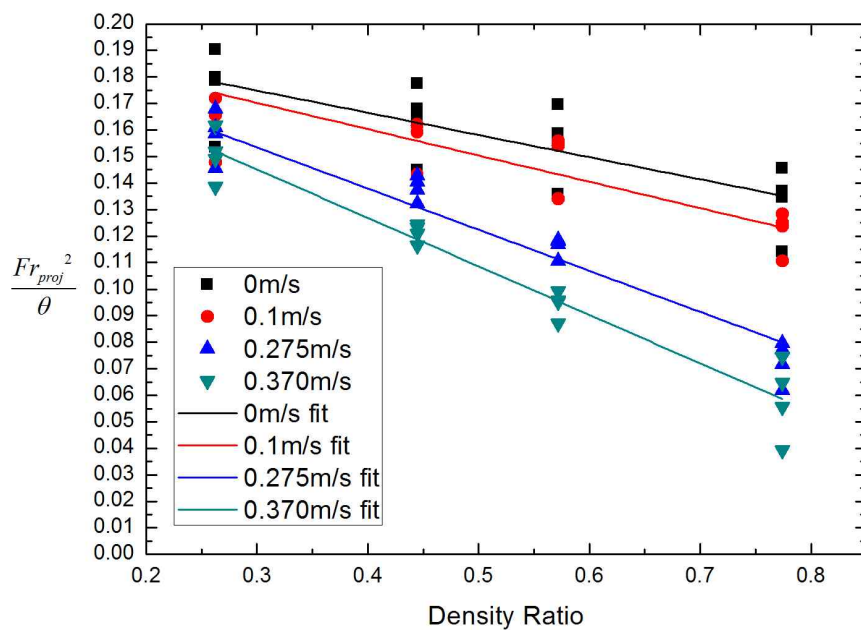


그림 4.11 Fr_{proj}^2 / θ vs 밀도 비

5. 결론

본 연구에서는 고온가스로 소형 파단시의 공기유입현상을 이해하기 위하여 4가지 주요 변수에 대한 실험과 전산유체해석을 실시하였다. 이를 통해 공기유입률을 측정 및 계산하고 변수별 영향을 살펴보았다. 실험과 해석의 공통적인 결과는 다음과 같다.

- 밀도 비의 감소(밀도 차의 증가)에 따라 유입률은 증가한다.
- 파손 각도가 0도에서 110~115도까지 증가함에 따라 유입률은 증가하며, 그 이후 110~115도에서 180도 까지는 유입률이 오히려 감소한다. 이는 유입 매커니즘의 변화 때문이다.
- 최대 유입 각도는 밀도 차, 내부 유속 등 다른 변수에 영향 받지 않는다.
- 밀도 비가 작을(밀도 차가 클)수록 각도의 효과가 크다. 이는 각도 변화로 인한 유입 매커니즘의 변화가 구동력인 밀도 차이가 클수록 크게 드러나기 때문이다.
- 내부 유속의 증가에 따라 60~150도는 유입률 감소, 0, 30도는 유입률 증가를 보인다.
- 내부 유속의 증가에 따른 유입률 변화는 다른 변수들의 영향에 비하여 상대적으로 매우 작지만, 유입률이 매우 크게 변화하는 특정 유속 지점이 나타나며 이 이후는 관성력이 유입 현상에 지배적인 것으로 보인다.
- 관성력이 유입 현상에 지배적인 영역에서는 유속의 증가에 따라 유입률이 증가한다. 이는 베르누이의 원리에 의한 것으로 예상된다.
- 파손을 통해 유입/배출되는 기체는 서로 반대 방향이며, 이들이 파손 단면적을 차지하는 비율은 같지 않다. 또한 이 비율은 밀도 비, 내부 유속, 파손 각도 등 다른 변수들에 영향을 받으므로 본 연구에서는 미리 계산된 유입 면적 비 α 를 제안한다.

또한 공통적이지 않은 현상에서 주목할 만한 것은 다음과 같았다.

- 실험에서 약 0.7 이상의 높은 밀도 비(낮은 밀도 차) 구간에서의 유입률은 대체로 각도에 의한 구분이 어려우며 이는 부력의 영향이 약하고 관성력이 크게 작용하기 때문일 것으로 예상된다.
- 그러나 해석 결과에서는 높은 밀도 비 구간에서도 위와 같은 현상을 발견할 수 없었다. 이는 실험의 높은 밀도 비 구간에서는 부력의 영향이 약해지며 관성력으로 인한 불안정성이 파손 주변에 형성되어 유입에 영향을 미치는 것으로 예상된다. 이러한 점을 고려한다면 해석 결과에서 전체적으로 유입률이 실험값보다 낮게 계산된 것을 이해할 수 있다.
- 실험에서 3mm, 6mm 등의 작은 파손 지름에서는 각도에 의한 유입률 차이가 두드러지지 않으며 이 또한 부력의 영향이 충분히 작용할만한 교환 표면적이 형성되지 않아 파손 주변에서 관성력이 크게 작용하기 때문일 것으로 예상된다.

이 같은 결과를 바탕으로 무차원수를 분석한 결과는 다음과 같다.

- 부력과 관성력의 우세성 판단 기준으로 본 연구에서는 식 (4.10)의 $Fr_{criteria}$ 를 제안하며, 이 무차원 수가 약 2.00인 지점을 기준으로 이하에서는 부력 우세, 이상에서는 관성력이 우세한 것으로 보인다.

이와 같은 결과를 종합할 때, 공기유입현상은 명백히 네 가지 변수에 영향을 받으며 지배매커니즘에 있어 밀접하게 서로 연관되어 있다. 이처럼 본 연구에서는 각 변수들이 공기유입률에 미치는 영향을 확인하였으며 이를 통해 추후 연구에서 모델 개발을 진행할 예정이다.

참고문헌

- [1] Schultz et al., "Next generation Nuclear Plant Methods Technical Program Plan", INL/EXT-06-11804, Rev 3, December 2010
- [2] KAERI, "State of Art Report for the OECD-NEA Loss-of-Forced Cooling (LOFC) Test Project using HTTR Reactor, AR-884/2011
- [3] INET, "HTR-10 Experiments Report - Loss of Helium Flow without Reactor Scram", NH-JRC-P1-R06-009, KAERI/INET Internal Report, 2006.5
- [4] Gilbert Melese, Robert Katz, "Thermal and Flow Design of Helium-Cooled Reactors", American Nuclear Society, 1984, pp. 181-185
- [5] Xiaowei et al., "Effect of temperature on graphite oxidation behavior" *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 227, pp. 273-280
- [6] General Atomics, "Gas turbine-modular helium reactor (GT-MHR) conceptual design description report" Rev1, 910720, July 1996
- [7] Oh, C. H. et al, "Final Report on Experimental Validation of Stratified Flow Phenomena, Graphite Oxidation, and Mitigation Strategies of Air Ingress Accidents",

INL/EXT-10-20759, Jan. 2011.

- [8] M.Hishida et al., “Researches on air ingress accidents of the HTTR”, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 144, pp. 317-325
- [9] E.S.Kim, Oh, C.H., “Small Break Air ingress Experiment”, INL/EXT-11-23380, Idaho National Laboratory, Sep. 2011.
- [10] Oak Ridge National Laboratory, “Next Generation Nuclear Plant Phenomena Identification and Ranking Tables (PIRTS) : Volume 2, Accident and Thermal Fluids Analysis PIRTs”, ORNL/TM-2007/147, Vol. 2.
- [11] Shiozawa et al., “Overview of HTTR Design Features”, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 233, pp. 11-21
- [12] ANSYS, 2011, *CFX-14* Manual.

Abstract

Jae Soon Kim

Department of Nuclear Engineering

The Graduate School

Seoul National University

The Very-High-Temperature-Reactor (VHTR) is one of the GEN-IV reactor concepts using carbon layered TRISO-fuel, graphite-moderator. In spite of its inherent safety concept, VHTR can be detrimental if a LOCA-type accident occurs that results in the loss of coolant and depressurization through the break. After the break, the air in the cavity ingresses into the reactor by both local density-gradient driven flow and molecular diffusion. This air-ingress accident could eventually lead to structural degradation or release of the toxic and explosive gasses (CO) by oxidation of graphite. Previously, the many air-ingress studies have been focused on the worst case scenario which is called the double-ended-guillotine-break (DEGB). On the other hand, less attention has been given to more probable and realistic small break accidents, which will be discussed in this study. According to the previous studies, the phenomena in the small break accident appear to be much more complicated than those in the DEGB, but little information are available so far.

This study experimentally investigates air-ingress phenomena that might occur under the LOCA accident with small break size. In order to obtain air-ingress rates into the helium flow loop, this study measures variations of oxygen concentrations in the helium flow loop for various flow and break conditions. The main parameters in considerations are (1) break orientation, (2) break size, (3) main flow velocity, and (4) density ratio. As a result, it was observed that the air ingress rates increase with (1) increase of density difference, (2) increase of hole size, (3) increase of main flow velocity, and (4) increase with hole angles from 0deg to 90~120deg. However, for higher than 120deg, the air ingress rate starts to decrease due to the shifting the mechanisms. The collected data are currently used for development of a flow regime map and air ingress models for small break accident analysis in the VHTRs

Keywords

Very High Temperature Reactor, Air ingress, Small break, CFD, Experiment,
Student Number: 2013-21008